

Proyecto de Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Estudio y optimización del uso de estructuras de soporte para impresoras 3D de tecnología DLP

MEMORIA

Autor: Víctor Lorenzo Fernández

Director: Roger Uceda Molera

Convocatoria: Junio 2016



Escuela Técnica Superior
de Ingeniería Industrial de Barcelona



RESUMEN

La impresión 3D está experimentando un rápido desarrollo en estos últimos años, siendo muy importante e incluso imprescindible en diferentes ámbitos de la industria. Por lo tanto, se podría decir que nos estamos adentrando en una nueva época, de la que se dice que la línea que separa el mundo digital del mundo físico se está volviendo cada vez más borrosa. Así que, el contenido del proyecto gira en torno a esta relevante tecnología de fabricación.

El proyecto se inicia con la inmersión en el mundo de la impresión 3D, explicando su importancia en la actualidad, sus aplicaciones y el gran potencial que ofrece. Posteriormente, se detallan las tecnologías de impresión más importantes, incluyendo, por supuesto, la tecnología en la que se basa este proyecto, la DLP. Esta tecnología de impresión es la empleada por la LUX de *BCN3D Technologies*, de la que se ha realizado un estudio exhaustivo de sus propiedades, del tipo de material que utiliza, del software y del proceso de impresión que lleva a cabo, con el fin de mejorarlo.

Una de las partes más relevantes del proyecto es el estudio de dicho proceso de impresión, ya que modelando sus características y las fuerzas que intervienen, se puede tomar una serie de consideraciones que serán válidas para la impresión de cualquier pieza mediante esta impresora. Así que, una vez modelado el proceso de impresión, se ha podido determinar la gran importancia que tiene la preparación del modelo digital de una pieza antes de imprimirla.

Dicha preparación incluye el uso de estructuras de soporte, que dependerán de una previa orientación del modelo digital de la pieza. Las estructuras de soporte tienen una gran relevancia en la tecnología de impresión que utiliza la LUX, ya que todas las piezas se deben aposentar sobre dichas estructuras de soportes. Por lo tanto, además de garantizar una correcta impresión, estas estructuras de soporte no deben adherirse en exceso a la pieza, ya que posteriormente se deben retirar. Este es otro de los objetivos del proyecto, la optimización del uso de estas estructuras de soportes, ya que como se ha comentado, tienen un papel muy importante en este tipo de tecnología 3D.

Con todo esto, se ha diseñado y llevado a cabo un proceso experimental con el objetivo de determinar una serie de parámetros (relacionados con las estructuras de soporte) para garantizar una correcta impresión. Además, dicha experimentación también se ha diseñado con el objetivo de que las fuerzas surgidas durante el proceso de impresión se pronuncien y de esta manera ver si su modelización ha sido correcta. Finalmente se han tomado una serie de conclusiones en relación a los resultados obtenidos, proponiéndose además un posterior estudio para proseguir con la optimización del proceso de impresión.

SUMARIO

RESUMEN	1
SUMARIO	3
GLOSARIO	6
1. PREFACIO	8
1.1 Origen del proyecto.....	8
1.2 Motivación.....	8
1.3 Requerimientos previos	8
2. INTRODUCCIÓN	9
2.1 Objeto del proyecto	9
2.2 Alcance del proyecto	9
3. LA IMPRESIÓN 3D	10
3.1 Historia de la impresión 3D	10
3.2 Las nuevas ventajas que ofrece la impresión 3D	12
3.3 Aplicaciones. Presente y futuro de la impresión 3D	14
3.3.1 Ingeniería y arquitectura. Prototipado rápido	15
3.3.2 Sector médico	15
3.3.3 Sector Aeroespacial	17
3.3.4 Joyería y moda.....	17
3.3.5 Otras aplicaciones.....	18
3.4 Aplicaciones actuales de la impresión 3D de tecnología DLP	20
4. LA TECNOLOGÍA DE IMPRESIÓN 3D	21
4.1 Manufactura aditiva	21
4.2 El formato STL y la división por capas	21
4.3 Tecnologías de impresión 3D	23
4.3.1 Modelado por deposición fundida (FDM).....	24
4.3.2 Sinterización selectiva por laser (SLS)	25
4.3.3 Estereolitografía (SLA)	26
4.3.4 Procesamiento digital de la luz (DLP)	28

5. ESPECIFICACIONES BCN3D LUX.....	30
5.1 Descripción de la máquina	30
5.2 Propiedades físicas	30
5.3 Electrónica y motor	31
5.4 Propiedades de impresión	32
5.5 Materiales.....	34
5.5.1 <i>Material de impresión. Resina fotosensible</i>	34
5.5.2 <i>Plataforma de construcción y cubeta</i>	36
5.6 Software	36
5.6.1 <i>Parámetros que definen el proceso de impresión</i>	37
5.6.2 <i>Características principales para la preparación de un modelo</i>	38
6. ANÁLISIS DEL PROCESO DE IMPRESIÓN	40
6.1 Fuerzas y tensiones	40
6.2 Fuerza de separación	40
6.2.1 <i>Fuerza de adhesión</i>	41
6.2.2 <i>Fuerza gravitatoria</i>	41
6.2.3 <i>Fuerza de succión</i>	41
6.3 Tensiones debidas a la fuerza de separación	42
6.4 Fuerza de compresión	45
6.5 Tensiones debidas a la fuerza de compresión	47
6.6 Fuerza debida a la recirculación de resina	48
6.7 Consideraciones a la hora de imprimir	49
7. PREPARACIÓN DEL MODELO	51
7.1 Orientación del modelo.....	51
7.1.1 <i>Orientación en base a la reducción de fuerzas de impresión</i>	51
7.1.2 <i>Orientación en base a la colocación de soportes</i>	52
7.1.3 <i>Otros aspectos importantes de la orientación del modelo</i>	53
7.2 Creación de una base para el modelo	54
8. ESTRUCTURAS DE SOPORTE	55
8.1 Localización de las zonas que deben ser soportadas.....	55

8.2 Condiciones para el diseño de los soportes	55
8.3 Tipos de soportes	56
9. EXPERIMENTACIÓN.....	59
9.1 Objetivos	59
9.2 Proceso experimental	60
9.3 Definición del proceso de impresión	62
9.4 Resultados obtenidos	65
9.4.1 Pieza probeta 1	65
9.4.2 Pieza probeta 2	66
9.4.3 Pieza probeta 3	66
9.4.4 Pieza probeta 4	67
9.5 Conclusiones del proceso experimental	67
9.5.1 Irregularidades en las piezas impresas	68
9.5.2 Reconsideración de las fuerzas planteadas	70
9.5.3 Posible solución.....	71
10. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y COSTES.....	73
10.1 Planificación temporal. Diagrama de Gantt	73
10.2 Costes del proyecto	74
11. ASPECTOS AMBIENTALES	76
11.1 Impacto medioambiental	76
CONCLUSIONES	77
<i>Posibles actuaciones futuras</i>	77
BIBLIOGRAFÍA.....	78
ANEXOS.....	80
A.1 MSDS de la resina SPOT-LV	80
A.2 TDS de la resina SPOT-LV	88

GLOSARIO

DLP (Digital Light Processing): Tecnología de impresión 3D basada en el procesamiento digital de la luz para crear objetos tridimensionales.

FDM (Fused Deposition Modeling): Tecnología de impresión 3D basada en el modelado por deposición de material fundido.

SLS (Selective Laser Sintering): Tecnología de impresión 3D basada en la sinterización selectiva por láser.

TED (Technology, Entertainment, Design): Organización sin fines de lucro dedicada a las "Ideas dignas de difundir".

CAD (Computer Aided Design): Consiste en el uso de un amplio rango de herramientas computacionales para diseñar objetos en 3D.

STL (Standard Tessellation Language): Es el formato de archivo informático de CAD más estandarizado que define geometría de objetos en 3D.

SHS (Selective Hot Sintering): Tecnología de impresión 3D basada en la sinterización selectiva por calor.

LMD (Direct Metal Laser Sintering): Tecnología de impresión 3D basada en el sinterizado por láser en una capa de metal pulverizado.

SLM: (Selevtive Laser Melting): Tecnología de impresión 3D basada en la fusión selectiva por láser.

EBM (Electron Beam Melting): Tecnología de impresión 3D basada en la fusión mediante un haz de electrones.

EBF3 (Electron Beam Free Form Fabrication): Tecnología de impresión 3D basada en la soldadura por haz de electrones.

LOM (Laminated Object Manufacturing): Tecnología de impresión 3D basada en laminado de capas de material.

SLA (StereoLitogrAphy): Tecnología de impresión 3D basada en la Estereolitografía.

Radiación UV (UltraVioleta): Radiación electromagnética cuya longitud de onda está comprendida aproximadamente entre los 400nm y los 15nm.

MSDS (Material Safety Data Sheet): Ficha que reúne los datos de seguridad del material, debido a sus propiedades químicas.

TDS (Technical Data Sheet): Ficha que reúne los datos técnicos y propiedades mecánicas del material.

1. PREFACIO

1.1 Origen del proyecto

Este proyecto nace de una necesidad real que tienen los usuarios de la impresora LUX de *BCN 3D Technologies* a la hora de preparar una pieza antes de realizar su impresión. Dicha preparación, consta principalmente en la orientación de la pieza y del uso de las estructuras de soporte de manera adecuada.

Para la tecnología de impresión en que se basa la LUX, siempre es necesaria la utilización de estructuras de soporte y es por ello que tienen tanta importancia y deben conocerse todos los factores que intervienen en su diseño y optimización. Según el personal de *BCN3D Technologies*, las pocas especificaciones exactas relacionadas con la impresión de las piezas se han obtenido mediante la experimentación, así que este proyecto ha surgido, entre otras cosas, para determinar ciertos parámetros de impresión en base a un análisis previo del proceso de impresión que se lleva a cabo.

1.2 Motivación

La principal motivación de este proyecto es la necesidad de resolver un problema real, que no únicamente tienen los usuarios de la LUX, sino que también se puede extrapolar al resto de las impresoras 3D de tecnología DLP. Actualmente, no existe ningún software que te prepare la pieza de la forma más óptima automáticamente, sino que cada usuario es el encargado de orientar la pieza antes de imprimirla y, de colocar los soportes donde sea necesario, determinando sus características.

Por otra parte, otra gran motivación a la hora de realizar este proyecto es el gran interés que me surge entorno al mundo de la impresión en 3D. Estoy sumamente convencido de que esta innovadora tecnología de fabricación va a ser mundialmente utilizada debido a las grandes ventajas que ofrece respecto a las tecnologías de fabricación convencionales. Sólo es cuestión de tiempo que las diversas tecnologías de impresión vayan mejorando. Así que, en este aspecto, me embarco en este proyecto para intentar mejorar una faceta de la tecnología de impresión DLP.

1.3 Requerimientos previos

Para la realización de este proyecto ha sido necesario el consentimiento de *BCN3D Technologies* para poder estudiar su impresora de tecnología DLP, la LUX.

Dicha impresora se encuentra en la *Fundació CIM*, así que las pruebas necesarias se realizarán en estas instalaciones.

2. INTRODUCCIÓN

2.1 Objeto del proyecto

La realización de este proyecto tiene dos claros objetivos. En primer lugar, la profundización en mundo la impresión 3D ya que, como se ha comentado en el punto anterior, creo firmemente que esta nueva tecnología de fabricación va a ser mundialmente extendida porque aporta algo muy distinto al resto. El segundo objetivo del proyecto es el estudio del proceso de impresión llevado a cabo por la LUX, para así poder establecer, mediante la modelización de las fuerzas implicadas en dicho proceso de impresión, la orientación óptima del modelo digital de las piezas y, sobretodo, la utilización de estructuras de soporte más óptima.

Así que, conociendo las fuerzas implicadas en el proceso de impresión, se podrá disminuir su efecto sobre la pieza mediante una orientación óptima de ésta, y una correcta elección y colocación de las estructuras de soporte. Estos son los principales factores que se quieren determinar mediante este estudio, ya que de esta forma , se agilizaría y mejoraría tanto el pre-procesado, como el post-procesado.

2.2 Alcance del proyecto

El proyecto, como se ha comentado en el punto anterior, se basa en el estudio del proceso de impresión de la LUX para una posterior optimización del uso de las estructuras de soporte.

En primer lugar, se parte de que la utilización del software para colocar dichos soportes en la pieza limita el diseño de nuevas formas. Por lo tanto, el estudio queda restringido a lo que puedan ofrecer los distintos softwares de diseño libres. Por otra parte, existen varios softwares libres con los que se puede trabajar, y cada uno te ofrece distintas posibilidades de la colocación y forma de los soportes. Así que, hay distintas combinaciones sobre los soportes a utilizar.

Por lo tanto, este proyecto se basará en el estudio del proceso de impresión de la LUX para poder determinar ciertos parámetros que ayudarán a realizar impresiones satisfactorias, y mediante una serie de pruebas se intentará validar las hipótesis tomadas en la en dicho estudio y sacar nuevas conclusiones.

3. LA IMPRESIÓN 3D

3.1 Historia de la impresión 3D

Los inicios de la impresión 3D se remontan a 1984 [1], cuando Charles Hull, un inventor destacado en el campo de la óptica iónica, estuvo experimentando con ciertas resinas líquidas que se solidificaban con la exposición a la luz ultravioleta.

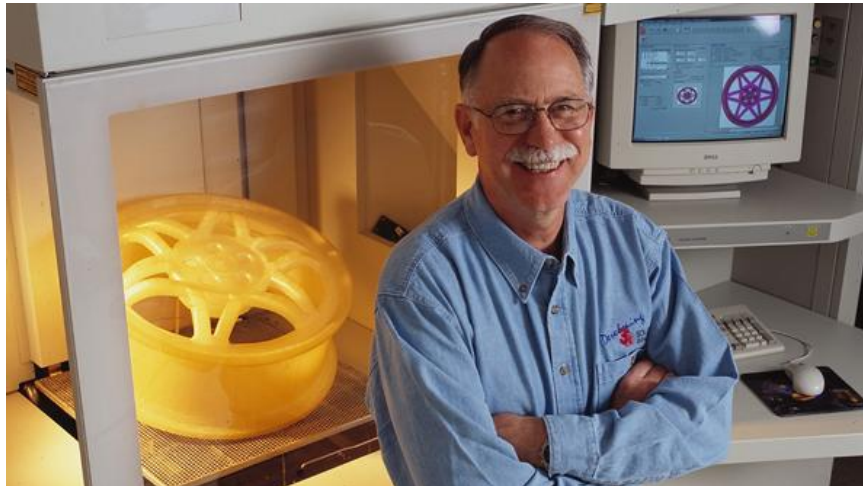


Fig. 3.1. Charles Hull, padre de la impresión 3D.
Fuente: www.industryweek.com

De este modo, Hull se dio cuenta que con un rayo laser, uno puede solidificar ciertas partes de la resina, formando una película en la que las partes sólidas representan un corte transversal de un objeto tridimensional. Así que, controlando el movimiento del láser mediante una computadora, Hull desarrolló un sistema que dibujaba el objeto capa por capa en una batea de resina líquida, la cual iba bajando poco a poco cuando cada capa estaba solidificada.

En 1986, el inventor obtuvo la patente de su nuevo proceso, al que llamó estereolitografía y posteriormente fundó la empresa *3DSystems*, que hoy en día está entre las líderes mundiales del mercado de impresoras 3D. A continuación, en la figura 3.2, se muestra una figura sacada de la patente de la primera impresora 3D de Charles Hull.

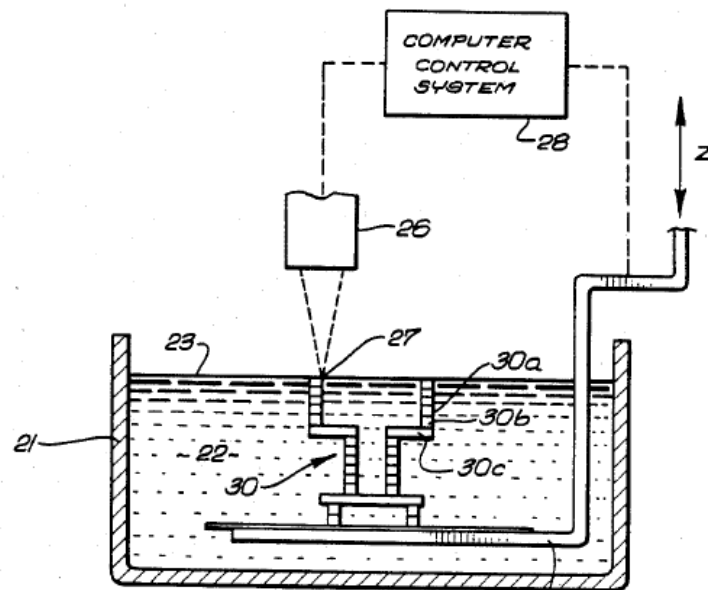


Fig. 3.2. Primera idea de impresora 3D.

Fuente: Patente US4575330 A, Charles Hull

Posteriormente, entre 1988 y 1990 surgieron dos nuevas tecnologías de impresión [2], una basada en la deposición capa a capa de material fundido (FDM) y la otra basada en la impresión por laser (SLS), que se detallarán más adelante. Ese mismo año Scott Crum, creador de la tecnología FDM, estableció la *Stratasys*, otra empresa situada en lo más alto en cuanto a impresión en 3D.



Fig. 3.3. Logos actuales de las empresas *3DSystems* y *Stratasys*, fundadas por Charles Hull y Scott Crum, respectivamente

Fuente: www.3dsystems.com ; www.stratasys.com

Poco a poco han ido surgiendo nuevas tecnologías de impresión, que se detallaran más adelante, nuevos materiales con los que imprimir y, por lo tanto, nuevas empresas que intentan buscar su sitio en el mercado. Pero en el fondo, todas comparten el mismo principio, construyen productos capa por capa usando distintos procesos de adición de material. Por eso, el nombre técnico para la impresión 3D es Tecnología de Manufactura Aditiva.

3.2 Las nuevas ventajas que ofrece la impresión 3D

La razón de porqué la impresión 3D tiene tanto potencial, es porque ofrece una serie de ventajas [3] que los otros tipos de tecnología de fabricación les es imposible ofrecer. A continuación se ha realizado un listado con las ventajas más relevantes que permite la manufactura aditiva.

- **La complejidad de fabricación no eleva el coste.** Mediante la impresión 3D, a diferencia del resto de procesos de fabricación tradicional, para fabricar una forma compleja y ornamentada no hace falta más tiempo, habilidad o coste que para imprimir un simple bloque del mismo tamaño.
- **Control sobre la estructura interna de los objetos.** La fabricación aditiva permite construir la estructura interior de los objetos de una forma mucho más optimizada. Por ejemplo, en lugar de un interior sólido, un objeto puede tener en su interior una grilla fina de material calculada por el software, con el fin de poner precisamente la cantidad de material necesaria para la rigidez deseada. Esta libertad de diseñar el interior de los objetos según su función, permite un ahorro en el uso de insumos.



Fig. 3.4. Estructura interna que forma parte del cuadro de una bicicleta.

Fuente: www.imprimalia3d.com

- **La versatilidad de las impresoras 3D. Personalización sin límites.** Una sola impresora 3D es capaz de crear innumerables formas diferentes. En cambio, las máquinas de fabricación tradicional son mucho menos versátiles y el espectro de formas que pueden crear es limitado. Por lo tanto, la impresión 3D evita el sobrecoste y el tiempo que conlleva la formación de los operadores en las máquinas tradicionales.

Así que, para crear nuevas formas en una impresora 3D, sólo se necesita un diseño digital diferente y un lote nuevo de materia prima, pero no se requiere ningún cambio en el hardware. Por lo tanto, las impresoras 3D son ideales para la producción que exige un alto grado de personalización, como, por ejemplo, coronas odontológicas o las prótesis auditivas, donde la forma del producto tiene que ser precisamente ajustada para cada usuario.

- **Producción de piezas ya ensambladas.** Al crear los objetos por capas, las impresoras 3D tienen la capacidad de crear las piezas completas, sin necesidad de un posterior ensamblaje. Actualmente, se realizan este tipo de impresiones para piezas de un único material, ya que las impresoras que pueden imprimir con varios materiales a la vez tienen un coste muy elevado. Por lo tanto, cuando esta tecnología se desarrolle, se disminuirá el precio de la fabricación del producto ya que acortaría las cadenas de suministro y ahorraría en mano de obra y transporte.



Fig. 3.5. Eje y ruedas de un vehículo impresas en 3D ya ensambladas.
Fuente: www.zcrop.com de 3DSystems

- **Elaboración bajo demanda.** Una impresora 3D tiene la capacidad de imprimir bajo demanda, es decir, siempre que un objeto haga falta. Este hecho tiene un gran potencial ya que permite a las empresas crear objetos especializados (o personalizados) en respuesta a las peticiones de los clientes. Además, esta característica podría disminuir drásticamente los costos de gestión y almacenamiento de inventario, ya que las empresas sólo imprimirán las piezas cuando sean necesarias.
- **El uso de recursos más económico.** Mediante los procesos de fabricación tradicionales normalmente se pierde una gran cantidad de material. Por ejemplo, se estima que en los tornos y fresadoras se desperdicia un 90 por ciento del metal original. En cambio, mediante la manufactura aditiva solo se usa el material que se necesite, por lo tanto esto implica un descenso de los costos de los insumos y, más importante aún, lleva a una economía más sustentable ya que se generarían menos residuos.

- **Transporte digital.** Al igual que hoy en día puedes enviar archivos de música de una parte del mundo a otra sin coste alguno, también implica que se pueda enviar diseños digitales de todo tipo de objetos. Por lo tanto, teniendo empresas que puedan imprimir dichos objetos cerca de tu localidad, permitiría un ahorro importantísimo en transporte y tiempo. Otro ejemplo sería tener en una empresa de mantenimiento una impresora 3D que te permitiera imprimir in situ el recambio que te hiciera falta en ese momento.

Como se puede apreciar, la manufactura aditiva puede ofrecer muchas ventajas respecto a la manufactura tradicional. Pero este tipo de tecnología aún está en pleno desarrollo y aún tiene que mejorar en muchos aspectos para que todas las ventajas citadas anteriormente sean una realidad.

3.3 Aplicaciones. Presente y futuro de la impresión 3D

La impresión en 3D consiste en la convergencia entre hardware, software y materiales. Precisamente el rápido desarrollo del software y los materiales en esta última década [4] es lo que ha permitido que la impresión en 3D sea una tecnología cada vez más eficiente y económica.

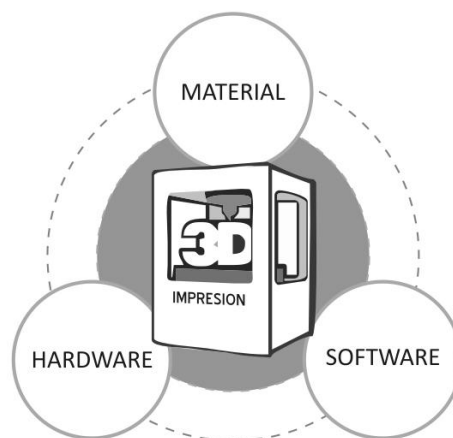


Fig. 3.6. Triángulo estratégico de la impresión 3D

Fuente: Impresión 3D. Cómo va a cambiar el mundo

En un futuro no muy lejano, este tipo de manufactura estará mundialmente extendida ya que nuestros ordenadores están adquiriendo la habilidad de crear productos directamente de archivos digitales, de la misma manera que imprimimos en papel. Estamos entrando en una nueva época, en la cual la línea que separa el mundo digital del mundo físico se volverá cada vez más borrosa. Así, que se podría decir que la impresión 3D va a cambiar el mundo de la fabricación tal como la conocemos.

3.3.1 Ingeniería y arquitectura. Prototipado rápido

En la actualidad, las impresoras 3D ya están siendo indispensables para algunas empresas. De entre las aplicaciones más extendidas, destaca el Prototipado Rápido (*Rapid Prototyping*).

El Prototipado Rápido permite producir, mediante la impresión 3D, modelos y prototipos directamente a partir del modelo sólido 3D generado en un sistema CAD [5]. Por lo tanto, la impresión 3D ofrece la posibilidad de obtener físicamente dicho prototipo de forma rápida y barata, permitiendo a los diseñadores e ingenieros ver si el aspecto y el comportamiento físico del producto es el esperado. Por lo que respecta a los arquitectos, les permite realizar maquetas de forma rápida, económica y, sobretodo, precisa. Este hecho, hace que las empresas de este tipo sean más eficientes ya que se consigue disminuir el tiempo entre el diseño y el producto operativo.

A continuación, en la figura 3.7, se muestran dos ejemplos de prototipado rápido utilizado en ingeniería y arquitectura.

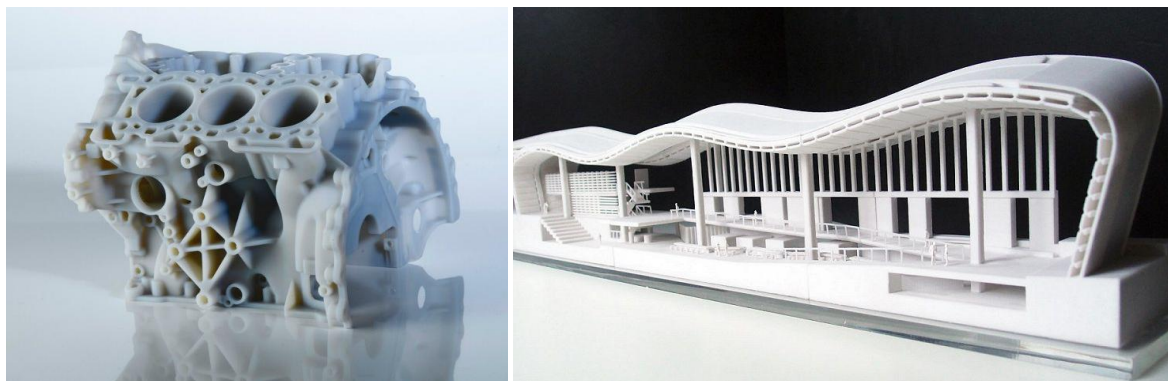


Fig. 3.7. Ejemplos de Prototipado Rápido. De izquierda a derecha, un bloque motor y la maqueta de un edificio

Fuente: www.impresoras3d3.com ; www.arquitexs.com

3.3.2 Sector médico

Desde hospitales, hasta universidades y laboratorios de investigación, el número de instituciones médicas interesadas en la impresión 3D va aumentando día a día con aplicaciones como implantes a medida, planificación de cirugías, investigación en bioimpresión de órganos vivos y, sobre todo, audífonos y aparatos dentales. Sin ir más lejos, la empresa *Invisalign* hace a diario unos 50.000 aparatos dentales a partir de moldes impresos en 3D [6] y en el mundo ya existen más de tres millones de audífonos impresos en también en 3D [7].

El uso de impresión 3D en prótesis está avanzando rápido. En el año 2012 se insertó un hueso de titanio impreso en 3D en la mandíbula de una mujer belga de 83 años que tenía cáncer de boca [8]. Hoy, trasplantes de este tipo ya no son una novedad y existen muchos casos exitosos de trasplantes de caderas, mandíbulas y otras partes del cuerpo.

Aunque este tipo de impresoras no sean especialmente baratas en algunos casos debido a los materiales utilizados, como titanio o cerámica entre otros, comercialmente tienen mucho sentido ya que su mercado reside en el hecho de que se ajustan perfectamente a cuerpos de forma única. Su forma personalizada y el hecho de que su fabricante no dependa de la economía a escala, hace que sean aplicaciones perfectas para la impresión 3D. Seguidamente, en la figura 3.8, se muestran algunos ejemplos de las aplicaciones reales que tiene la impresión 3D en el sector médico.



Fig. 3.8. Aplicaciones en medicina de la impresión 3D

Fuente: www.impresiontresde.com

Además de las comentadas anteriormente, se están investigando futuras aplicaciones en medicina que tendrán las impresoras 3D en un futuro no muy lejano.

3.3.3 Sector Aeroespacial

Por otro lado, las piezas impresas en 3D están siendo funcionalmente importantes en el sector aeroespacial, ya que mediante la fabricación aditiva se está consiguiendo reducir el número de piezas a utilizar y el peso de las piezas ya que permite hacer diseños más eficientes, como decidir sobre el diseño interno de la estructura. Además de fabricar piezas resistentes y más ligeras, al mismo tiempo se reduce el tiempo y los costes de fabricación. Sin ir más lejos, la empresa *Stratasys* imprimió en 3D más de mil piezas para el avión A350 XWB de Airbus [9].



Fig. 3.9. Airbus A350 en el aire, con más de 1000 piezas impresas en 3D
Fuente: www.aviationweek.com

3.3.4 Joyería y moda

Además de aplicaciones relacionadas con ingeniería o medicina, la impresión 3D se está adentrando en accesorios de la vida cotidiana y la moda. La personalización y las infinitas formas que te permite hacer esta tecnología, está despertando la curiosidad de distintos diseñadores. Por otra parte, la impresión 3D se está utilizando para el sector de joyería, ya que la increíble precisión y la posibilidad de utilizar materiales calcinables permite crear moldes de gran definición, que posteriormente servirán para crear la joya con el material deseado mediante algún otro método de fabricación tradicional como el moldeo a la cera perdida.

A continuación, en la figura 3.10, se muestran dos ejemplos de aplicaciones en joyería y moda de la impresión 3D.

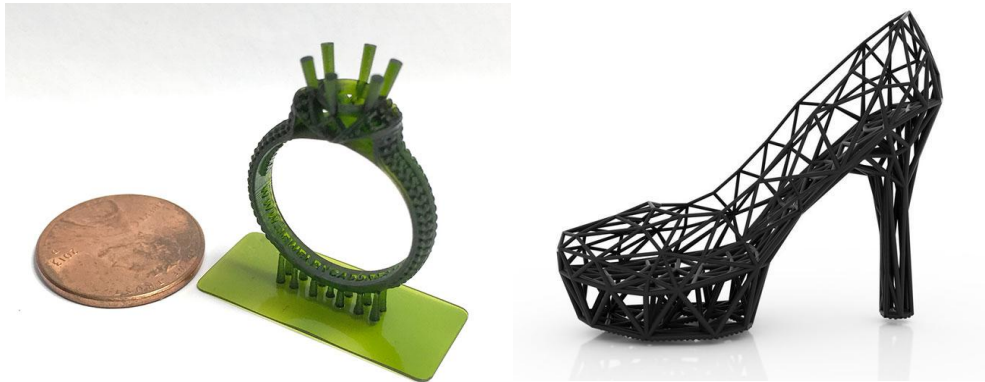


Fig. 3.10. Aplicaciones en joyería y moda. Izquierda, el molde de un anillo. Derecha, un zapato de tacón

Fuente: www.kudo3d.com ; www.impresoras3d3.com

3.3.5 Otras aplicaciones

A parte de todas las aplicaciones comentadas anteriormente, hay muchas más con un gran potencial como la impresión de comida (*Food Printing*), de tejidos vivos (*Bioprinting*), de hormigón o de objetos cotidianos y, que en un futuro no muy lejano, tendrán una gran importancia en sus sectores. A continuación, en la figura 3.11, se muestra un ejemplo de impresión de comida y de un objeto cotidiano.



Fig. 3.11. Izquierda, impresión de una hamburguesa. Derecha, accesorio personalizado para iPad.

Fuente: www.3dprinterclub.org ; www.print3dworld.es

Por ejemplo y aunque parezca increíble, se están empezando a imprimir estructuras de hormigón de más de 2 metros de alto, 7 metros de largo y unos 4 metros y medio de ancho [10]. Dicha impresora se conoce como la *Contour Crafting*, mostrada en la figura 3.12, que al igual que el resto de impresoras, extrude materia prima (en este caso hormigón reforzado con fibra) por la boquilla de un cabezal de impresión. Cabe decir que la NASA está investigando en esta tecnología para algún día crear colonias en el espacio.



Fig. 3.12. El *Countour Crafting* imprimiendo hormigón.
Fuente: www.linespacespace.com

Otra aplicación increíble que se está desarrollando es la impresión de tejidos vivos y órganos. Una prueba de ello la proporciona el cirujano Anthony Atala, que consiguió imprimir un riñón humano e incluso lo ha llevado a las aclamadas conferencias TED [11]. Además, y en base a su estudio, científicos chinos han logrado desarrollar una técnica para obtener pequeños órganos vivos impresos en 3D, como el que se muestra en la figura 3.13.



Fig. 3.13. Riñón impreso por el equipo de Anthony Atala
Fuente: www.ted.com

Finalmente, todo tipo de objetos cotidianos como utensilios de cocina, juguetes o accesorios para la casa también se pueden llevar a cabo mediante la impresión 3D. Muchos de los diseños de estos objetos cotidianos se pueden encontrar en diferentes sitios web, pero cabe destacar www.thingiverse.com, un portal de internet donde los usuarios suben sus modelos en 3D y cualquier persona puede descargárselos e imprimirlos.

3.4 Aplicaciones actuales de la impresión 3D de tecnología DLP

Como se ha visto en los puntos anteriores, hay infinidad de aplicaciones ofrecidas por la impresión 3D. Algunas de ellas, como el prototipado rápido, ya son imprescindibles para sectores como la ingeniería o la arquitectura. Otras, como la impresión de órganos vivos, se están desarrollando y en un futuro no muy lejano tendrán una gran importancia en el sector médico.

Dicho esto, la tecnología empleada por la LUX (DLP), que se detallará más adelante, también tiene un gran potencial debido a la gran precisión en sus impresiones. Actualmente, hay dos sectores donde tiene una gran relevancia, en joyería y ortodoncia.

Por lo que respecta el sector de joyería, este tipo de impresoras se dedican a imprimir moldes de joyas, como se puede observar en la imagen de la izquierda de la figura 3.10, ya que para hacer este tipo de moldes se necesita una gran precisión y el uso de materiales calcinables. Es por eso que la tecnología DLP tiene una gran importancia en este sector.

Por otro lado, respecto a la ortodoncia, además del escaneo y la impresión de modelos de dentaduras, destaca otra aplicación, la impresión de guías quirúrgicas. A continuación, en la figura 3.14, se muestra una guía quirúrgica sobre un molde de una dentadura.



Fig. 3.14. Guía quirúrgica impresa en 3D sobre un molde de una dentadura también impresa en 3D.

Fuente: www.odontoespacio.net

Este tipo de aplicaciones es lo que le da un sentido real al proyecto, ya que, por ejemplo, si el molde del anillo no está hecho con la precisión necesaria, o tiene marcas debido a la retirada de soportes, el anillo que saldrá de este molde también será defectuoso. Lo mismo ocurre con las guías quirúrgicas, si la pieza no tiene el alto grado de detalle que requiere, o hay algún tipo de imperfección debido a los soportes, puede acarrear problemas muy serios. Cabe decir que estas guías se deben imprimir con resina biocompatible.

4. LA TECNOLOGÍA DE IMPRESIÓN 3D

4.1 Manufactura aditiva

Como se ha comentado anteriormente, la impresión 3D es una tecnología de fabricación que crea objetos tridimensionales mediante la superposición de capas de material. Es por ello que esta tecnología es formalmente conocida como manufactura aditiva o *Additive Manufacturing (AM)*. Además de las distintas tecnologías existentes para crear una pieza mediante la superposición de capas, es necesario preparar el modelo digital en 3D antes de realizar dicha impresión.

En este punto se explicará en qué consiste la preparación de un diseño digital y los diferentes tipos de tecnologías de impresión en la actualidad, detallándose las más relevantes e incluyéndose, por supuesto, la tecnología utilizada en este proyecto.

4.2 El formato STL y la división por capas

Para la impresión de cualquier objeto, es necesario partir de un modelo generado previamente por algún programa de CAD. Los archivos de diseño pueden estar en una gran variedad de formatos, cada cual con sus características y peculiaridades. Una vez realizado el diseño, es necesario convertirlo al formato STL para que las impresoras puedan reconocerlo e imprimirlo.

El formato STL es un archivo estándar de la industria creado por Chuck Hull, que lleva décadas usándose y fue concebido como una manera sencilla de guardar información sobre objetos 3D. Empezó a utilizarse en las máquinas de estereolitografía de la empresa *Startasys*, pero gracias a sus características ha sido adoptado por el resto de tecnologías consolidándose como principal formato de impresión 3D.

La característica principal del formato STL [12] es que define la forma de los objetos 3D 'envolviéndolos' en una superficie virtual, conocida como malla, compuesta por miles de polígonos interconectados. Estos polígonos, que suelen ser triángulos, describen únicamente la geometría de la superficie de los objetos, excluyendo información como color, texturas o unidades físicas (que sí incluyen otros formatos CAD). De esta forma, se reduce la información a procesar por la impresora. Cuanto más pequeños sean estos polígonos, mayor será la resolución del fichero final pero, obviamente, también aumentará el peso de dicho fichero. Por lo tanto, es necesario establecer un equilibrio entre precisión y tamaño del archivo, ya que archivos muy pesados pueden resultar difíciles de manejar.

A continuación, en la figura 4.1, se muestra una comparación de una misma pieza con distintas densidades de mallado.



Fig. 4.1. Pieza con distintas densidades de mallado. Formato CAD (pieza gris); formato STL (superficie triangulada)
Fuente: www.r3ald.com

Una vez el archivo STL se ha preparado para poder ser impreso, es decir, se ha orientado y se han añadido los soportes necesarios, el software de la impresora realiza una división por capas de altura definida por el usuario, como se muestra en la figura 4.2. Cada capa representa un corte transversal de lo que será el objeto final y, obviamente, al disminuir la altura de capa se aumentará la precisión y el tiempo de impresión. Actualmente, y dependiendo de la tecnología de impresión empleada, esta altura de capa puede ir desde la decena de micrómetros hasta unos pocos milímetros. Una vez realizada la división necesaria, la impresora empieza a imprimir el objeto capa a capa.



Fig. 4.2. Representación esquemática de la división e impresión de un objeto por capas.
Fuente: www.emaze.com

4.3 Tecnologías de impresión 3D

Una vez preparado el archivo de diseño, sólo queda imprimir el objeto. Llegados a este punto, hay varios tipos de impresoras 3D, que se diferencian en la manera de crear las distintas capas que forman el objeto. Las tecnologías de impresión 3D pueden ser categorizadas en seis grupos principales, que se presentan en la tabla 4.1 junto con las aplicaciones más comunes [13] [14]. Posteriormente se explicarán las tecnologías más extendidas.

GRUPO	TECNOLOGÍA	APLICACIONES COMUNES
Extrusión	Modelado por deposición fundida - FDM	Prototipado rápido, <i>Food printing</i> , bioimpresión, piezas funcionales
Sinterización/ Fusión selectiva	Sinterización selectiva por láser - SLS	Fabricación de piezas funcionales de distintas aleaciones de metal
	Sinterización selectiva por calor - SHS	
	Sinterizado láser directo de metal - LMD	
	Fusión selectiva por laser - SLM	
	Fusión por haz de electrones - EBM	
Inyección	Impresión por inyección de adhesivo	Impresión de estructuras de hormigón (<i>Contour Crafting</i>), plásticos, maderas...
Soldadura con rayos de electrones	Fabricación por haz de electrones - EBF3	Piezas funcionales de metales y aleaciones
Manufactura de objetos laminados	Laminado de capas - LOM	Patrones, ensayos de medida y forma, piezas poco detalladas
Fotopolimerización	Estereolitografía - SLA	Prototipado, ortodoncia, joyería, moldes
	Procesamiento digital de luz - DLP	

Tabla 4.1 Clasificación general de los diferentes tipos de tecnologías de impresión 3D

4.3.1 Modelado por deposición fundida (FDM)

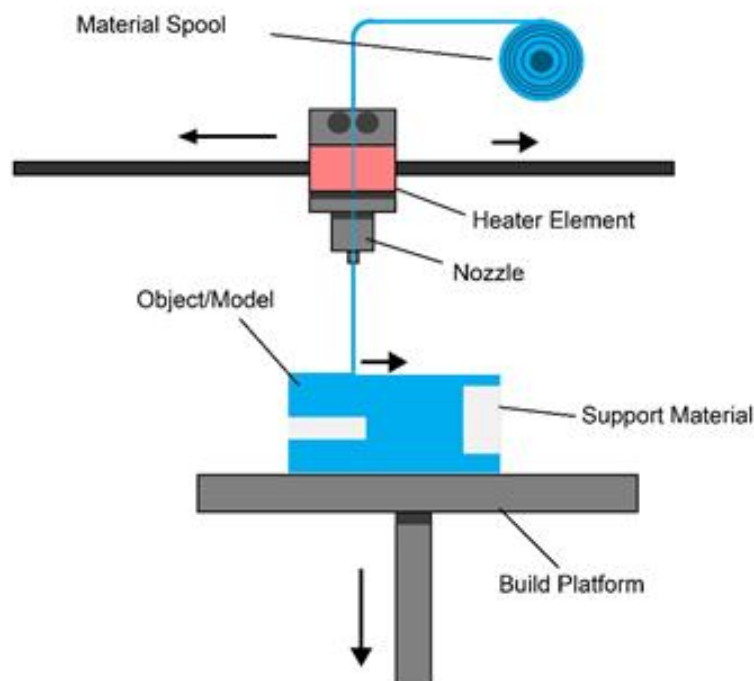


Fig. 4.3. Representación esquemática de la impresión mediante la tecnología FDM

Fuente: www.3dparts.co.uk

La tecnología FDM [15] es la más común y reconocida de las tecnologías de impresión 3D. Se basa en la formación de la pieza capa a capa mediante la extrusión de un filamento termoplástico a una temperatura justo por debajo de su temperatura de fusión, con el objetivo de que el material se encuentre en estado semilíquido y a la vez solidifique inmediatamente sobre la capa depositada, como se puede observar en la figura 4.3.

De esta manera, el proceso se inicia con la deposición del termoplástico semilíquido a través de la boquilla de extrusión, la cual traza la primera capa transversal de la pieza sobre la plataforma de construcción. A continuación, el extrusor (o la plataforma de construcción, dependiendo del tipo de impresora) se desplaza verticalmente una distancia igual al grosor de capa deseado y traza nuevamente la capa contigua a la anterior. Este proceso se va repitiendo hasta obtener la pieza final.

Por contra, este tipo de proceso requiere la adición de estructuras de soporte para cualquier geometría con voladizo. Por otro lado, esto no es un problema para las impresoras FDM con doble extrusor, ya que permiten imprimir dichos soportes con un material diferente al de construcción, lo que permite ser retirados fácilmente con la mano o incluso disolverse en una solución acuosa.

Este tipo de impresoras dejan un acabado áspero en la superficie ya que no son capaces de realizar capas muy finas debido a que este factor depende del tamaño de la boquilla. Además, se considera una de las tecnologías de impresión más lenta. No obstante, es la tecnología más extendida ya que es limpia, fácil de usar y adecuada para el uso doméstico por su bajo coste.

Por último, cabe decir que el término modelado por deposición fundida y su abreviatura (FDM) son propiedad de *Stratasys Inc.* El término exactamente equivalente, fusionado y fabricación de filamentos (FFF), fue acuñado por los miembros del proyecto *RepRap* para dar una frase que sería jurídicamente sin restricciones en su uso.

4.3.2 Sinterización selectiva por láser (SLS)

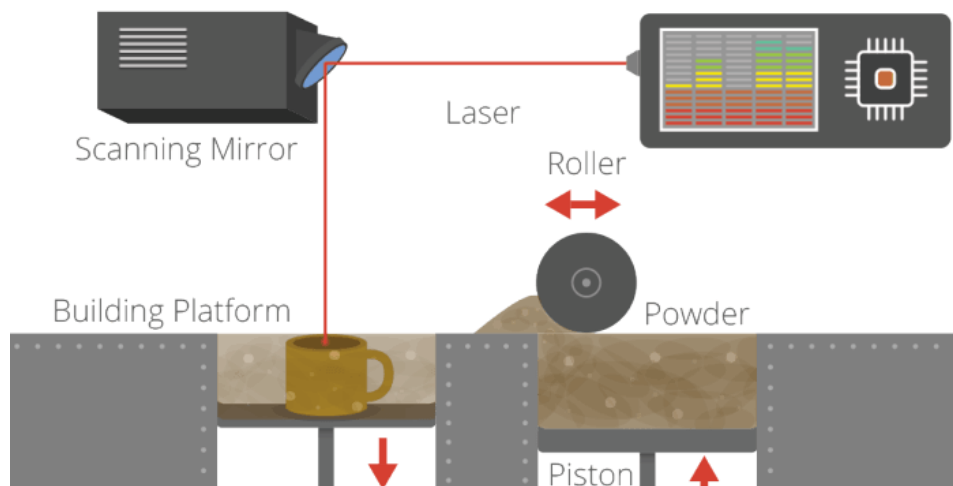


Fig. 4.4. Representación esquemática de la impresión mediante la tecnología SLS
Fuente: www.3dprintingindustry.com

La sinterización selectiva por láser [16] se basa principalmente, como su propio nombre indica, en la sinterización de material en polvo mediante un rayo láser. El término sinterización se refiere a un tratamiento térmico que crea enlaces entre las partículas del polvo usando temperaturas inferiores a la temperatura de fusión del material.

El proceso se inicia con la plataforma en la posición superior con una capa de material en polvo que se reparte uniformemente por toda su superficie. Seguidamente, un rayo láser sinteriza la primera capa de la pieza, quedando compactada y adhiriéndose a la plataforma. Posteriormente, la plataforma desciende una distancia igual a la altura de capa deseada y, mediante un rodillo, se vuelve a extender una nueva capa de material en polvo sobre la superficie de dicha plataforma, como se ve representado en la figura 4.4.

De esta forma, el láser vuelve sinterizar otra capa, que se unirá con la capa anterior. Este proceso se repite sucesivamente hasta completar la pieza.

Una vez acabado el proceso, se retira la pieza del resto de material en polvo, el cual se puede volver a utilizar para otra impresión. Una de las grandes ventajas de esta tecnología es que no necesita de estructuras de soporte ya que el material en polvo que no se va sinterizando durante la impresión, es lo que sostiene la pieza. Además, debido al calor que puede generar un láser y la capacidad de trabajar con material en polvo, la SLS es la tecnología más común para formar piezas con metales y aleaciones.

Esta tecnología permite hacer capas de muy poco espesor y no es considerado un sistema de impresión especialmente lento. Sin embargo, al trabajar a tan altas temperaturas, necesita de un gran tiempo de enfriamiento. Además, las piezas que provienen de la compactación de material en polvo, no tienen un buen acabado y para según qué aplicaciones no dispone de unas propiedades mecánicas adecuadas.

4.3.3 Estereolitografía (SLA)

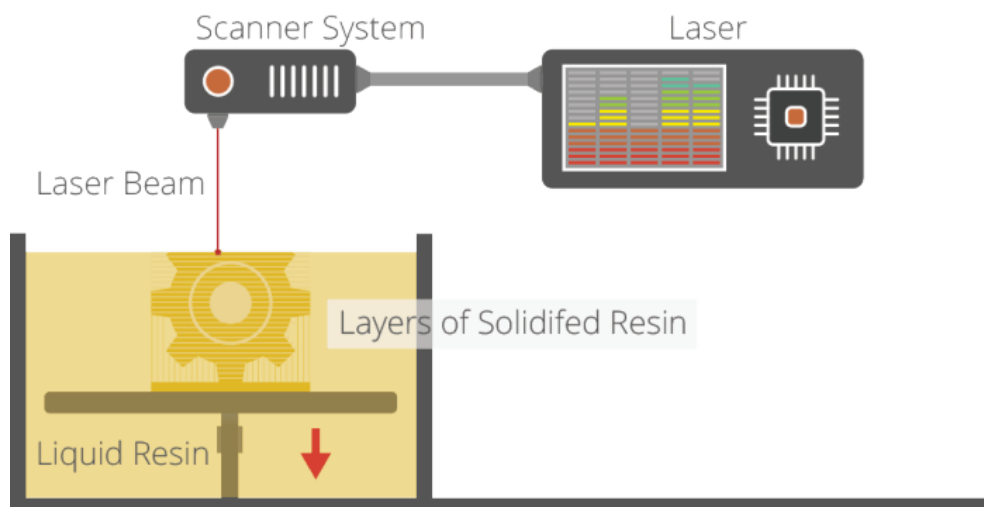


Fig. 4.5. Representación esquemática de la impresión mediante la tecnología SLA
Fuente: www.3dprintingindustry.com

El proceso de estereolitografía [17] se basa en la fotopolimerización, es decir, la utilización de resinas líquidas que solidifican cuando son expuestas a una cantidad suficiente de luz UV.

La impresora dispone una cubeta llena de la resina líquida con una plataforma de construcción en su interior. Inicialmente, dicha plataforma se sitúa una distancia de la superficie igual al grosor de la primera capa a solidificar. A continuación, se procede a la iluminación selectiva mediante un rayo láser dirigido, que solidifica la primera sección transversal de la pieza. Seguidamente, la plataforma de construcción desciende una distancia igual al grosor de capa deseado, sumergiendo la pieza en la resina. Finalmente, el láser vuelve a trazar la sección transversal contigua a la capa anterior. El proceso, el cual se puede ver en la figura 4.5, se repite sucesivamente hasta obtener la pieza final.

Para este tipo de impresiones se requiere de estructuras de soporte debido a que está apoyada en resina líquida, y no en material en polvo como pasaba en la SLS. Así que, la resina líquida por sí sola es incapaz de soportar la formación de capas al voladizo. Cabe decir que las estructuras de soporte podrán ser más esbeltas que en el caso de la FDM, ya que la densidad de la resina ofrece algo más de consistencia a los soportes. No obstante, los soportes serán del mismo material que el resto de la pieza y habrán que retirarlos manualmente.

El proceso es terminado con un post-curado en un horno especial de rayos UVA para darle solidez y dureza a la pieza.

La estereolitografía es conocida como uno de los procesos de impresión más precisos, con un excelente acabado ya que permite hacer capas de muy poco espesor. Esto es debido a que la resolución depende del tamaño del punto óptico del láser, que puede ser mucho menor que la boquilla de extrusión en la FDM, por ejemplo. Por contra, no es una impresora especialmente rápida y como se ha comentado anteriormente, es necesario un cuidadoso post-procesado. Además, la altura de las piezas depende de la profundidad de la cubeta, que no suele ser muy profunda ya que esto comportaría la utilización de una gran cantidad de resina líquida para llevar a cabo las piezas.

4.3.4 Procesamiento digital de la luz (DLP)

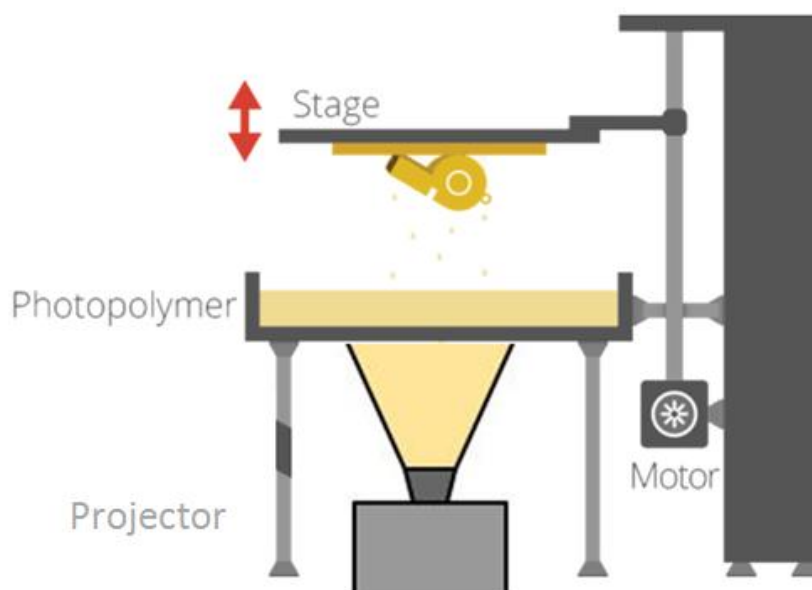


Fig. 4.5. Representación esquemática de la impresión mediante la tecnología DLP

Fuente: www.3dprintingindustry.com

Esta tecnología de impresión, conocida como DLP [18], es similar a la estereolitografía, ya que ambos trabajan con la fotopolimerización, pero divergen en ciertos puntos.

Igual que en la SLA, esta impresora dispone de una cubeta que contiene resina líquida fotosensible. En este caso, la plataforma de construcción se encuentra en la parte superior de la impresora.

Al iniciar la impresión, la plataforma se sitúa a una distancia de la cubeta igual al grosor de la primera capa a solidificar. A continuación, se solidifica dicha capa mediante la luz emitida por el proyector. En este caso, no hay ningún láser que recorra la sección, sino que se proyecta la luz de todo el corte transversal durante un determinado período de tiempo, de la misma forma que se proyectaría una diapositiva de un PowerPoint. Una vez solidificada la capa, la plataforma de construcción se desplaza verticalmente una altura suficiente para que dicha capa se despegue de la cubeta, pero nunca por encima de la resina líquida. Esto es debido a que el proceso de impresión sería más lento y a la posible aparición de burbujas de aire en la pieza. Finalmente, la plataforma de construcción vuelve a descender para formar la capa adyacente, como se puede observar en la figura 4.5.

Igual que ocurría en la SLA, este proceso también requiere de estructuras de soporte para piezas con voladizo. Pero en este caso, deben ser más resistentes ya que dichas estructuras no se crean únicamente para formar las primeras capas de la superficie en voladizo, sino que además deben aguantar una serie de fuerzas surgidas durante este tipo de impresión, como la de adherencia de la resina a la cubeta o la fuerza de vacío generada en piezas huecas que se detallarán más adelante. Igual que pasaba en la SLA, las estructuras de soporte deberán ser retiradas manualmente y será necesario un post-curado de la resina para darle solidez y dureza a la pieza.

La DLP también destaca por su gran precisión y acabado en las piezas debido a la gran resolución que ofrece el proyector. Además el hecho de proyectar toda la sección de una sola vez, la hace más rápida que la SLA. Por otro lado, el desplazamiento ascendente de la plataforma de construcción, le permite hacer piezas de más altura y no es necesario una cubeta tan profunda, que se traduce en que no será necesaria tanta resina líquida para hacer según que piezas.

5. ESPECIFICACIONES BCN3D LUX

5.1 Descripción de la máquina

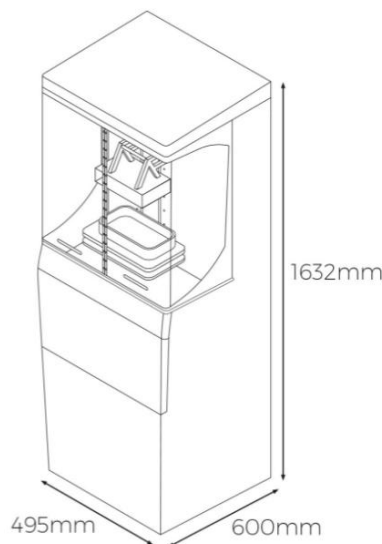
El estudio realizado en este proyecto está basado en la impresora LUX de la marca BCN3D Technologies, que utiliza la tecnología de impresión DLP, detallada en el punto anterior. Esta máquina ofrece una magnífica calidad y resolución de impresión que permite imprimir piezas para joyería, ortodoncia o para cualquier sector que precise el uso de moldes. Al utilizar la tecnología de impresión DLP, le permite imprimir tantas piezas como quepan en la superficie de impresión sin que esto afecte al tiempo necesario para fabricarlas. Así que, se tardará lo mismo en imprimir una que ocho piezas de la misma altura. A continuación se detallarán las propiedades de la LUX.



Fig. 5.1. BCN3D LUX

Fuente: www.bcn3dtechnologies.com

5.2 Propiedades físicas



Las dimensiones de la LUX presenta se pueden ver representadas en la figura 5.2. Su peso ronda entorno a los 100kg y su precio en el mercado es de 9195€. [19]

Como se puede intuir, debido a sus características físicas entre otros aspectos, esta impresora está pensada para un entorno industrial.

Fig. 5.2. Propiedades físicas de la LUX

Fuente: www.bcn3dtechnologies.com

5.3 Electrónica y motor

Por lo que respecta la electrónica, la LUX utiliza una placa Arduino Mega, como la que se muestra en la figura 5.3, que se encarga de controlar todos los procesos de la impresora. Arduino [20] es una compañía de hardware libre (open-source), que desarrolla placas que integran un microcontrolador y un entorno de desarrollo (IDE), que no es más que aplicación informática que facilita al programador el desarrollo del software. El hardware consiste en una placa de circuito impreso con un microcontrolador ATmega2560 (de *Atmel AVR*) con puertos digitales y analógicos de entrada/salida. La función principal del microcontrolador es controlar el motor a través de las órdenes recibidas por el computador, el cual se conecta a dicho microcontrolador por medio de un cable HDMI o USB. Como se ha comentado, Arduino es una compañía de hardware y software libre, lo que implica que toda la información entorno a la placa se puede encontrar de forma gratuita en la página web de Arduino.

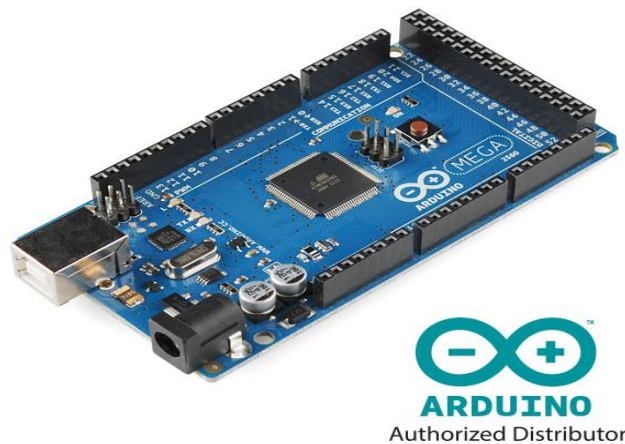


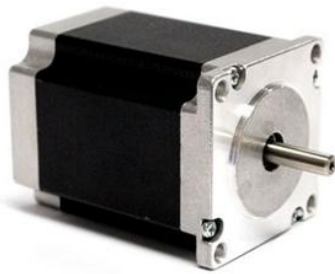
Fig. 5.3. Placa computadora *Arduino Mega*
Fuente: www.arduino.cc

Aunque en las propiedades de la LUX no venga especificado, usualmente se suele acoplar al Arduino Mega una placa auxiliar conocida como RAMP (*RepRap Arduino Mega Pololu Shield*) que permite controlar los elementos de potencia sin dañar el Arduino.

El driver que utiliza la LUX es el Pololu drv8825 [21]. El driver va conectado al Arduino o a la RAMP, si dispone de ella, y es el encargado de gestionar la potencia que se entrega al motor, mediante la variación de un potenciómetro que tiene él mismo. Todas las características de este driver pueden encontrarse en la página web oficial de Pololu.

El proyector utilizado es de alta definición (1080p) y de 250W de potencia.

Finalmente, el motor que utiliza la LUX es un motor paso a paso NEMA23. Dicho motor puede usarse como unipolar o bipolar y tiene un ángulo de paso de 1.8° , que corresponde a 200 pasos por vuelta. Además, el nivel sonoro que produce es inferior a 45dB. A continuación, en la figura 5.4, se presenta una imagen del motor junto con sus características principales[22].



- Ángulo de paso: 1.8°
- Longitud del motor: 56 mm
- Voltaje nominal: 3.6 V
- Corriente nominal: 2A
- Resistencia de fase: 1.8Ω
- Inductancia de fase: 2.5 mH
- Par de mantenimiento : 9 kg/cm
- Salidas: 6
- Inercia del rotor: 300 g/cm^3
- Par de detención: 400 g/cm
- Peso: 0.7 Kg

Fig. 5.4. Motor NEMA 23 y sus características

Fuente: www.hobbytronics.co.za

5.4 Propiedades de impresión

Una de las propiedades más determinantes es el volumen de impresión, ya que delimita el espacio a utilizar a la hora de realizar una impresión. La LUX dispone de un volumen de impresión de: **135mm x 70mm x 300mm**.

La LUX tiene una temperatura de trabajo máximo limitada a los **40°C**. En principio no se deben llegar a estas temperaturas ya que esta tecnología está basada en la utilización de resinas líquidas que solidifican cuando son expuestas a una cantidad suficiente de luz, y no de calor.

El proyector utilizado es de alta definición (HD), lo que supone que la LUX tenga una resolución horizontal (X-Y) de **0.07mm**. La resolución horizontal indica la distancia mínima que es capaz de trazar la impresora 3D. Por lo tanto, cuanto menor sea este valor, los detalles en el plano serán de más calidad. En comparación con otras tecnologías de impresión como la FDM, las piezas obtenidas mediante la DLP tienen un mayor detalle aunque el grosor de capa sea el mismo como se puede observar en la figura 5.5, debido precisamente a la elevada resolución en el plano que ofrece.



Fig. 5.5. Izquierda, impresión mediante DLP. Derecha, impresión mediante FDM. Ambas con altura de capa de 0.1mm
Fuente: www.formlabs.com

La resolución vertical (Z) es de **0.025mm**. Esta medida indica la altura o espesor de capa mínima que es capaz de hacer la impresora. Cuanto menor sea este valor, la superficie será más lisa y con resoluciones verticales tan bajas como la que ofrece la LUX, apenas se notará que la pieza ha sido formada a capas. Sin embargo, cuanto menor sea el espesor de capa se necesitará más tiempo para realizar la impresión. Por lo tanto, será importante determinar la altura de capa óptima para según qué tipo de pieza se vaya a imprimir. Las dos imágenes que se muestran a continuación mostradas en la figura 5.6 han sido impresas mediante la tecnología DLP.

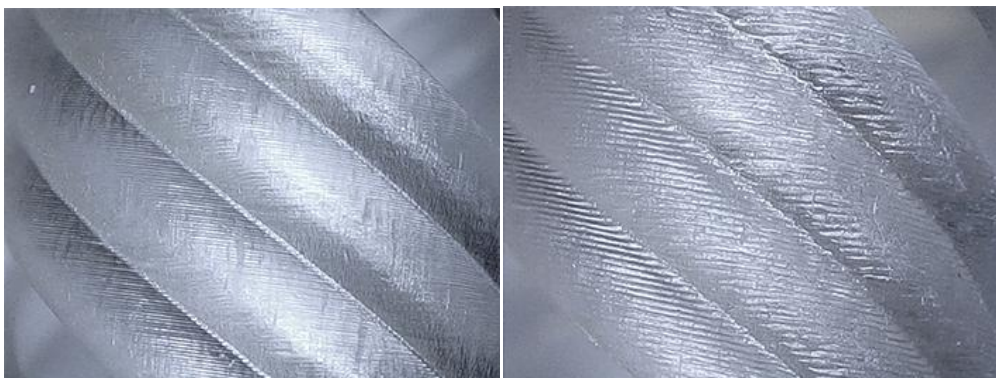


Fig. 5.6. Izquierda, altura de capa: 0.1mm; tiempo de impresión aprox.: 2 horas.
Derecha, altura de capa: 0.2mm; tiempo de impresión aprox.: 48 minutos.
Fuente: www.formlabs.com

5.5 Materiales

5.5.1 Material de impresión. Resina fotosensible

El material de impresión utilizado por la LUX es resina fluida fotoactiva, concretamente la SPOT-LV. La característica especial de esta resina líquida es que se cura (polimeriza) cuando queda expuesta a una cierta cantidad de energía radiante UV durante unos pocos segundos.

Según el distribuidor de resinas *SPOT-A Materials* y como se puede ver en el MSDS del anexo, esta resina pertenece a la familia de los acrilatos alifáticos. Además, se ha facilitado el porcentaje en peso de los principales componentes químicos que la forman, los cuales se muestran en la tabla 5.1.

Compuesto químico	% Peso
Acrilatos alifáticos (Base monómero)	90-100 %
Óxido de fosfina (Fotoiniciador)	1.5 %

Tabla 5.1. Propiedades químicas del Spot-LV

Observando los valores mostrados en la tabla 5.1, la resina empleada está formada principalmente por una base de acrilatos alifáticos y un pequeño porcentaje de óxido de fosfina, que hace la función de fotoiniciador. Los fotoiniciadores [23] son mayormente compuestos orgánicos capaces de absorber una longitud de onda determinada. En este caso, el óxido de fosfina es capaz de absorber la radiación UV y cuando esto ocurre, dicho fotoiniciador forma radicales libres con suficiente energía como para iniciar la polimerización a partir de los monómeros de acrilato. De este modo, la resina líquida se convertirá en un polímero sólido únicamente en aquellas zonas que hayan sido expuestas un cierto tiempo a dicha radiación UV.

El tiempo de exposición necesario para que la resina se polimerice completamente, no depende únicamente de su composición química, sino que además depende de la resolución tanto vertical como horizontal de la impresora y, sobretodo, de los lúmenes del proyector. Dichos lúmenes determinan la intensidad de iluminación (cantidad de fotones emitidos por unidad de tiempo) del proyector, así que, a más intensidad de iluminación, la luz penetrará mejor en la resina, provocando que endurezca antes y, por lo tanto, será necesario un menor tiempo de exposición.

Este es un punto importante, ya que como se comentará posteriormente, si el tiempo de exposición no es suficiente, la pieza se desmoronará, mientras que si el tiempo es excesivo, la pieza adoptará unas dimensiones mayores a las del modelo digital. Otras propiedades químicas que se destacan el MSDS son que es inodora, que no contiene compuestos orgánicos volátiles, y que su PH está en torno a 7.

Una vez se tiene la pieza solidificada, es necesario realizar un postcurado en un horno especial de rayos UVA, para darle solidez y dureza a la pieza.

Por otro lado, el distribuidor *SPOT-A Materials* también ha facilitado las propiedades mecánicas de la resina una vez solidificada y habiendo realizado el proceso de post-curado, las cuales se presentan en la tabla 5.2 y en la TDS del anexo. Además se incluye la viscosidad de la resina antes de ser endurecida.

Propiedades mecánicas	
Densidad	1.1 g/cm ³
Contracción experimental	6 %
Módulo de Young	726 MPa
Alargamiento a rotura	2 %
Tensión de rotura a tracción	22 MPa
Dureza en escala Shore	78, D
Viscosidad a 20°C	50 cps

Tabla 5.2. Propiedades mecánicas del Spot-LV

En comparación a otras resinas, la Spot-LV ofrece una serie de características que la hacen idónea para esta tecnología de impresión. Spot-LV es una resina de muy baja viscosidad que permite obtener piezas de elevada resolución y con buenas propiedades mecánicas con respecto a otras resinas.

Estas características permiten a la LUX realizar prototipos de piezas con un alto grado de detalle, además de poder realizar piezas funcionales para según qué aplicaciones debido a sus propiedades mecánicas. Una aplicación muy común de este tipo de impresoras es en ortodoncia, como se ha visto en el apartado 3.4.

Otra aplicación principal de esta impresora, que también se ha comentado en el punto 3.4, es en joyería, debido a que este tipo de resina es calcinable. Así que, se realizan piezas de joyería de resina que servirán de molde para verter sobre ellos algún metal fundido que adoptará la forma de la resina.

5.5.2 Plataforma de construcción y cubeta

La plataforma de construcción, como se ha comentado anteriormente, es la superficie donde se irá imprimiendo la pieza. Dicha plataforma, está hecha de lo que se conoce como *Blasted Aluminium*, que simplemente consiste en una placa de aluminio pero con la superficie un tanto áspera, normalmente erosionada mediante un chorro de arena. Se utiliza dicho acabado en la superficie con el objetivo de que no sea muy difícil retirar la pieza de la plataforma una vez se haya acabado el proceso de impresión.

Respecto al interior de la cubeta, que tendrá como objetivo tanto dejar pasar la luz UV como evitar una gran adherencia con la resina, está compuesta por una película de politetrafluoretileno, lo que comercialmente se conoce como Teflón. El Teflón es un material transparente, por lo que deja pasar la luz proyectada perfectamente, aunque hay que asegurarse que esté perfectamente limpia antes de realizar cualquier impresión. La película de Teflón está tensionada por sus extremos, como si de un tambor se tratara. El objetivo de que el interior de la cubeta sea de esta forma es para que permita una cierta deformación al despegar la resina, ya que si fuera una superficie totalmente rígida, dicha fuerza empleada para despegar la capa recién formada del Teflón sería significativamente mayor. Esto es debido a que la flexión del Teflón hace que la pieza no se separe de golpe, es decir, primero se despegue por los extremos. Si el Teflón fuera totalmente rígido, la separación de produciría de manera muy brusca. Con todo esto y teniendo en cuenta su poca adherencia con la resina lo hace una solución óptima para utilizarse como interior de la cubeta.

5.6 Software

El Software utilizado por la LUX es el *CreationWorkshop*. La función principal del *CreationWorkshop* es generar las 'órdenes' que se enviarán al microcontrolador ATmega2560 de la impresora para que pueda llevar a cabo la pieza. Estas 'órdenes' es lo que se conoce como GCode. Por lo tanto, para que se pueda generar el GCode, es necesario determinar todos los parámetros necesarios que se llevarán a cabo durante el proceso de impresión.

Además de generar el GCode, este software también permite preparar el modelo antes de imprimirlo, es decir, permite orientar el modelo de la forma deseada y crear estructuras de soporte. En este apartado se detallarán los diferentes parámetros a determinar antes de realizar cualquier impresión, además de las características principales para la preparación de un modelo.

5.6.1 Parámetros que definen el proceso de impresión

Como se ha comentado en el punto anterior, es necesario determinar una serie de parámetros necesarios para definir el proceso de impresión, con el objetivo de generar el GCode y dividir el modelo en capas. A continuación se muestra una lista con todos los parámetros a determinar.

- **Grosor de capa:** Determina la altura de cada capa en *mm*. La altura de capa estándar es de 0.05mm, que corresponde a 20 capas por milímetro de pieza.
- **Tiempo de exposición por capa:** Este valor corresponde al tiempo en que se estará proyectando la luz UV sobre cada capa. El tiempo debe ser suficiente para que la resina solidifique y se adhiera a la capa anterior, pero no debe ser excesivo para que la pieza no sufra un sobredimensionamiento. Este valor depende de la intensidad de la luz, del área proyectada y del tipo de resina.
- **Tiempo de exposición para las primeras capas:** Con el objetivo de unir fuertemente las primeras capas a la plataforma de construcción, se emplea un tiempo de exposición mayor, que normalmente es diez veces más grande que para el resto de capas.
- **Número de capas expuestas a mayor tiempo:** Se especifica el número exacto de capas iniciales que estarán más tiempo expuestas a la luz del proyector. Suelen ser las capas que forman la base y los soportes de la pieza.
- **Duración de una secuencia.** Este valor indica cuánto tardará la plataforma de construcción en, una vez solidificada la capa, elevarse hasta una cierta altura y volver a la posición adecuada para realizar otra capa. Este valor no hay que determinarlo, viene definido por los tres parámetros que se explican a continuación.

- **Altura de elevación.** Es la distancia que se elevará la plataforma de construcción después de solidificar cada capa. Este valor es constante, lo que va incrementando después de cada secuencia es la distancia entre plataforma y cubeta, con el objetivo de que la distancia entre la última capa solidificada y dicha cubeta sea el grosor de capa especificado anteriormente.
- **Velocidad de elevación.** Esta velocidad indica lo rápido que se eleva la plataforma la altura de elevación especificada en el punto anterior. Velocidades de elevación menores favorecen la separación entre la última capa curada y la película de Teflón.
- **Velocidad de descenso.** Esta velocidad es la que toma la plataforma, una vez se ha elevado la altura correspondiente, para volver a la nueva posición inicial. Esta velocidad suele ser mayor o igual que la de elevación.
- **Dirección de construcción.** *Bottom up* o *Top down*. Este valor indica si la plataforma de construcción va a ir elevándose o descendiendo para crear la pieza. Indirectamente indica la tecnología de impresión que se va a usar, SLA o DLP. Para la LUX habrá que indicar *Bottom up* ya que se basa en la tecnología DLP.

Una vez determinados estos parámetros, el *CreationWorkshop* ya es capaz de dividir la pieza por capas y generar el GCode. Además, calcula el tiempo estimado que durará la impresión.

5.6.2 Características principales para la preparación de un modelo

Como se ha comentado al inicio de este apartado, este software también es capaz de preparar la pieza antes de imprimirla, es decir, también te permite orientar la pieza en la posición deseada, crear estructuras de soporte y una base donde estos se aposenten. Por lo que respecta la orientación, este software te permite una libre orientación de la pieza de forma precisa.

En relación a la creación de soportes, estos se pueden generar de forma manual y automática. Para la generación automática de soportes, permite indicar la distancia entre ellos, pero según la pieza que se desee imprimir será necesario añadir o suprimir algún soporte de forma manual, ya que el software no tiene la capacidad para crear los soportes idóneos, tanto en su colocación como en su forma.

Precisamente, respecto a la forma, el *CreationWorkshop* permite dar a los soportes un cierto ángulo y además variar el diámetro de la base, del cuerpo y de la punta, como se puede apreciar en la figura 5.8.

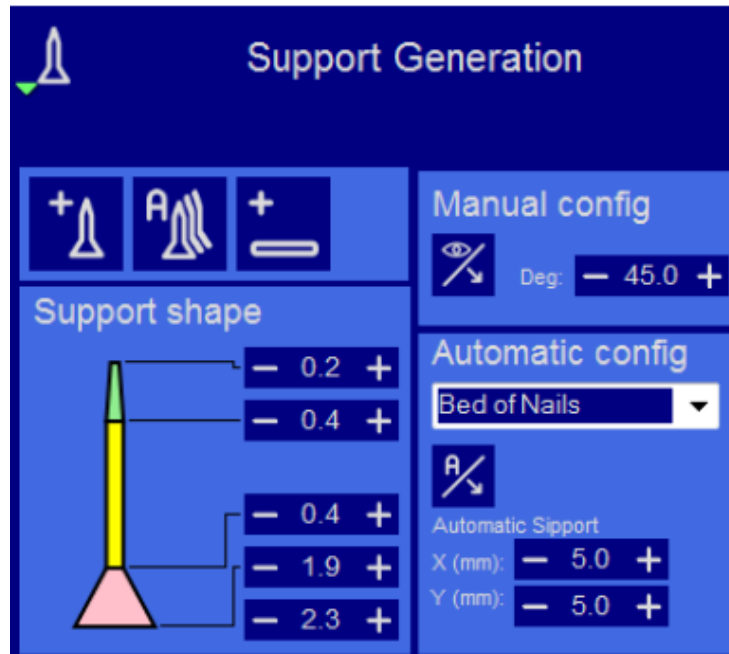


Fig. 5.8. Herramienta para la creación de soportes en el *CreationWorkshop*

Fuente: Propia. *Software CreationWorkshop*

Por contra, este software a parte de no ofrecer distintos tipos de formas (únicamente se basa en soportes de cuerpo cilíndrico y cónica), se limita a que los soportes sean todos de tipo columna, es decir, no permite unirlos entre ellos con el objetivo de crear una estructura de soporte más resistente en el caso de que hiciera falta.

Finalmente, nombrar los formatos de los archivos que permite abrir y modificar: STL, OBJ, AMF, PLY, 3ds, CWS. Este software se puede utilizar tanto en Windows como en Linux.

6. ANÁLISIS DEL PROCESO DE IMPRESIÓN

6.1 Fuerzas y tensiones

Para garantizar una correcta impresión, es decir, que la pieza cumpla con las especificaciones y no se desmorone durante el proceso de construcción, es necesario estudiar las fuerzas a la que se somete la pieza durante dicho proceso, con el objetivo de intentar reducirlas lo máximo posible. De este modo, reduciendo las fuerzas aplicadas a la pieza, también se reducirán las tensiones a la que se será sometida, aumentando así las posibilidades de que la impresión sea correcta.

Las fuerzas aplicadas a la pieza surgen en dos etapas distintas. La primera fuerza es debida a la resistencia que encuentra la plataforma de construcción al elevarse una cierta distancia justo después de haber formado una capa. Mientras que la otra fuerza aparece por la resistencia que se le ofrece a la plataforma cuando se desplaza de forma descendente hacia la distancia correspondiente para formar una nueva capa. Ambas fuerzas se han clasificado como fuerza de separación y de compresión, respectivamente.

Una vez estudiadas las fuerzas y tensiones, se expondrán una serie de consideraciones a tener en cuenta antes de realizar cualquier impresión, con el objetivo de reducir dichas fuerzas en la medida de lo posible. Además, este análisis también será la base para determinar tanto la orientación del modelo digital, como para la creación de estructuras de soporte.

6.2 Fuerza de separación

La fuerza de separación es una fuerza vertical hacia arriba que realiza la plataforma de construcción para separar una capa de resina recién solidificada del Teflón. Como se ha comentado en el punto anterior, hay que intentar reducirla lo máximo posible ya que puede que la fuerza requerida para despegar la resina del Teflón no pueda ser aguantada por alguna otra sección de la pieza.

Dicha fuerza de separación debe ser superior a la composición de una serie de fuerzas que se oponen a su movimiento ascendente. Se tomará como hipótesis inicial que la plataforma aplicará una carga uniforme vertical hacia arriba sobre la pieza hasta que se produzca la separación de capas.

En los siguientes apartados de esta sección, se analizarán las distintas fuerzas que se oponen al desplazamiento vertical de la plataforma.

6.2.1 Fuerza de adhesión

La fuerza principal que debe vencer la plataforma es debida a la adhesión química entre la resina y el Teflón. Esta adhesión aparece cuando se crea una nueva capa, ya que la resina además de adherirse a la capa anterior, también solidifica sobre el Teflón. Así que, cuanto mayor sea el área de la sección a solidificar, más cantidad de resina estará en contacto con el Teflón y, por lo tanto, requerirá que la plataforma deba realizar una fuerza mayor. En definitiva, habrá que intentar que el área por capa sea lo mínima posible.

6.2.2 Fuerza gravitatoria

Una de las fuerzas que inicialmente se debe analizar es el peso de la pieza que se desea imprimir. Como se ha comentado en puntos anteriores, la tecnología DLP se utiliza principalmente para la impresión de piezas que requieren una gran precisión como en joyería y ortodoncia o para el prototipado. Como es sabido, las joyas y las piezas de ortodoncia tienen un tamaño muy reducido, así que para este tipo de piezas se podrá considerar que su peso es negligible ya que la densidad de la resina utilizada es aproximadamente de un gramo por cada centímetro cúbico.

Por otro lado, y sabiendo que la LUX tiene una capacidad volumétrica de impresión de $135 \times 70 \times 300 \text{ mm}^3$, hace pensar que una pieza con este volumen tendría un peso no negligible. No obstante, hay que tener en cuenta que las piezas relativamente grandes (las dedicadas al prototipado) se modelan de forma hueca ya que únicamente importa su exterior. Además, de esta forma se ahorra una gran cantidad de material y se disminuye el área de contacto entre la resina y el Teflón, lo que supone una disminución de la fuerza de adhesión. En definitiva, se puede considerar que la fuerza gravitatoria es negligible.

6.2.3 Fuerza de succión

En relación a la creación de modelos huecos, surge otra fuerza que se opone al movimiento ascendente de la plataforma. Dicha fuerza se conoce como fuerza de succión, y surge por el hecho de que al formarse la nueva capa, se aumenta el volumen interior de la pieza, lo que provoca una disminución de la presión en su interior (siguiendo la expresión $P = nRT/V$). Así que, el Teflón se ve succionado por el modelo, creando así una oposición al desplazamiento vertical de la plataforma. Este efecto se puede comparar con la succión producida en un sistema cilindro-pistón como el que aparece en la figura siguiente.

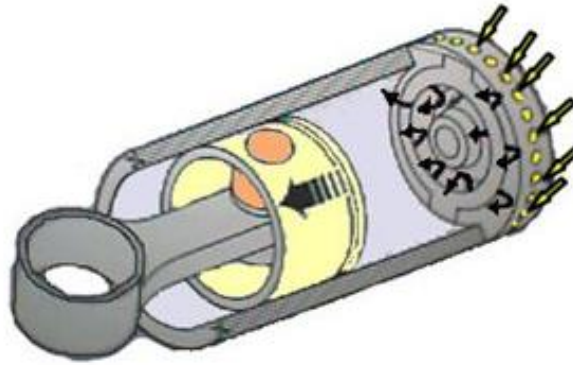


Fig. 6.1. Sistema cilindro-pistón realizando una fuerza de succión
Fuente: www.tecnologia-compresores.blogspot.com.es

En esta figura se puede observar que, cuando el pistón hace aumentar el volumen interior del cilindro, la tapa inferior se ve succionada, igual que le pasa al Teflón cuando se aumenta el volumen interior de la pieza que se está formando.

Como solución, se sugiere realizar pequeños orificios en la base del modelo con el objetivo de eliminar esta diferencia de presiones y que el Teflón no se vea atraído por el modelo.

En definitiva, se puede considerar que la fuerza de separación aplicada por la plataforma de construcción debe ser superior a la composición de la fuerza de succión (si el modelo es hueco) y de la fuerza de adhesión. A continuación se procederá a un primer análisis de las tensiones producidas por esta fuerza.

6.3 Tensiones debidas a la fuerza de separación

Como se ha comentado al inicio de este apartado, se ha supuesto que la plataforma aplicará un esfuerzo vertical de tracción sobre toda la pieza hasta que se separe la última capa solidificada del Teflón. Por lo tanto, suponiendo que dicho esfuerzo tiene una distribución uniforme sobre la sección transversal de la pieza, las tensiones a tracción generadas en cada sección también tendrán una distribución uniforme.

Por otro lado, dependiendo de la orientación de la pieza, puede que dicha fuerza de separación tenga una componente tangencial al plano debido a que, en ese caso, se estaría aplicando una tracción descentrada. No obstante, como hipótesis inicial y teniendo en cuenta el tipo de pieza que se va a imprimir, se ha considerado que dicha componente transversal es negligible respecto a la componente normal.

Otra hipótesis que se ha tomado inicialmente es considerar el Teflón rígido a la hora de plantear las fuerzas y tensiones. Se ha planteado así ya que aunque es cierto que el Teflón presenta una pequeña deformación cuando se está despegando la resina de su superficie, se cree que la componente transversal de la fuerza que aparece por dicha flexión es negligible. Dicho esto, se supone que la pieza únicamente recibirá esfuerzos normales a la superficie que supondrán tensiones normales a tracción [24].

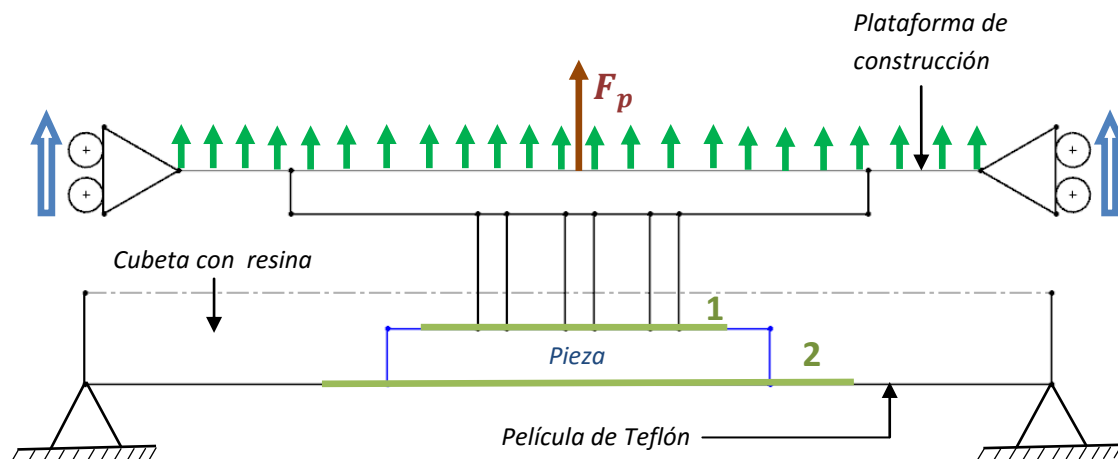
La tensión a tracción a la que estará sometida una sección cualquiera de la pieza será:

$$\sigma = \frac{F_p}{A}$$

F_p : Fuerza normal realizada por la plataforma, determinada a partir de la carga uniforme que realiza. [N]
 A : Área de la sección. [mm²]
 σ : Tensión uniforme repartida por el área de la sección. [MPa]

A partir de esta fórmula, se concluye que cuanto menor sea el área de sección, más tensionada estará la pieza. Dicho esto, habrán dos secciones a analizar, que serán las más susceptibles a que se pueda llevar a cabo una separación de capas.

Una es la sección de la última capa solidificada, que es la que se desea separar del Teflón. La otra es la sección con menos área de la pieza ya formada, ya que será la zona más tensionada y, por lo tanto, se podría llevar a cabo una separación entre dos capas de resina ya solidificadas, lo que conllevaría la rotura de la pieza. A continuación, en la figura 6.2, se muestra un esquemático del proceso de impresión de la pieza probeta que se va a imprimir, con la carga uniforme que realiza la plataforma para despegar la resina recién solidificada del Teflón, junto con las dos secciones a analizar.



1. Sección con menos área de la pieza ya formada. En este caso sería la suma del área de los soportes.
2. Sección de la última capa solidificada en contacto con el Teflón.

Fig. 6.2. Representación esquemática de la fuerza de separación en el proceso de impresión de tecnología DLP de una pieza.

Fuente: Propia

El esfuerzo normal F_p , determinado a partir de la carga uniforme q_p , está atravesando toda la pieza y, por lo tanto, las dos secciones marcadas están recibiendo unas tensiones a tracción que se pueden considerar uniformes y se representan según se muestra en la figura 6.3.

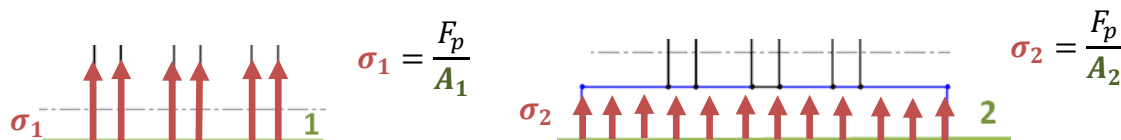


Fig. 6.3. Representación esquemática de las tensiones que reciben las dos secciones más críticas de la pieza.

Fuente: Propia

Como se puede observar en la figura 6.3, la sección en contacto con el Teflón está menos tensionada que la sección de los soportes, ya que ambas son recorridas por la misma fuerza F_p y la sección compuesta por la suma del área de los soportes es menor. No obstante, gracias a las propiedades del Teflón, la tensión a tracción que puede admitir la resina en contacto con el Teflón (la sección dos) es mucho menor a la que puede admitir una sección cualquiera de la resina ya sólida, ya que la resina se adhiere mucho más fuerte con la propia resina que con el Teflón.

De aquí se deduce que:

$$\sigma_{\text{máxima admisible},1}^{(\text{resina-resina})} \gg \sigma_{\text{máxima admisible},2}^{(\text{resina-Teflón})}$$

Así que, cuanto mayor sean las áreas de sección a formar, la plataforma deberá hacer una fuerza mayor. Esto es debido a que al aumentar el área de la capa que se está formando, las tensiones serán menores ya que se repartirán por un área mayor y, por lo tanto, será necesario aumentar F_p para que dicha sección llegue a su tensión máxima admisible, que es la que provocaría la separación entre la capa recién formada y la película de Teflón. Así que, este aumento de F_p podría provocar que otra sección de la pieza (con un área muy pequeña) no aguantara el aumento de tensiones que se produciría, lo que conllevaría a la rotura de la pieza.

Por lo tanto, habrá que tener muy en cuenta la relación de tamaños de las diferentes secciones que está compuesta la pieza. Es precisamente en esto en lo que se ha basado el proceso experimental, en buscar una relación de áreas mínima que permita una impresión correcta.

Una de las soluciones que se adopta para evitar áreas excesivas, es haciendo piezas huecas y, aunque haya que tener en cuenta que este tipo de piezas puedan generar una fuerza extra de succión, vale la pena vaciar el modelo.

6.4 Fuerza de compresión

Una vez separada la capa de resina del Teflón, la plataforma se desplaza de forma descendente hacia el interior de la cubeta. A medida que se va acercando, aparece una fuerza que se opone a este movimiento.

El porqué de esta oposición se explica mediante la definición de la viscosidad [25] y el caudal de la resina. La viscosidad es un parámetro que determina la resistencia que presenta un fluido a desplazarse y el caudal es la cantidad de flujo que circula a través de una sección por unidad de tiempo. La viscosidad hace surgir unas tensiones tangenciales de rozamiento que supondrán una resistencia por fricción al descenso de la plataforma. Suponiendo que la resina es un fluido newtoniano, el caudal y la tensión tangencial generada se definen de la siguiente manera:

$$Q = v \cdot A$$

Q: Caudal de fluido [mm³/s]
v: Velocidad del fluido [mm/s]
A: Área de la sección por la que circula el fluido [mm²]

$$\tau_{xy} = \mu \cdot \frac{dv_x}{dy}$$

τ_{xy} : Tensión tangencial debida al rozamiento del fluido con una superficie sólida [MPa]
 μ : Viscosidad dinámica del fluido. Únicamente depende de la temperatura [kg/mm·s]
 $\frac{dv_x}{dy}$: Es el gradiente de velocidad perpendicular a la dirección al plano en el que se está calculando la tensión tangencial [s⁻¹]

Por lo tanto, cuando la plataforma desciende, provoca que la última superficie de la pieza formada desplace un cierto caudal de resina. El caudal desplazado dependerá de la velocidad de descenso de la plataforma y del área inferior de la pieza ($Q = v_p \cdot A_s$), como se puede observar en la figura 6.4. Así que, cuanto mayor sea el área de la última capa de la pieza, más caudal de fluido se desplazará.

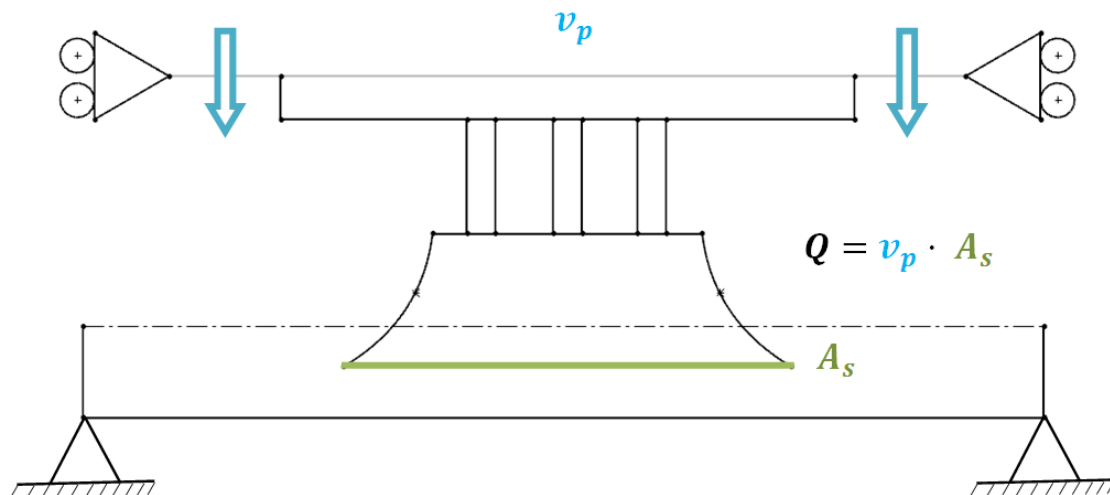


Fig. 6.4. Representación esquemática de cómo se aproxima la pieza al Teflón para formar una nueva capa.
Fuente: Propia.

A medida que la plataforma desciende, la resina que se encuentra confinada entre la pieza y el Teflón fluye hacia los laterales. Considerando que la plataforma mantiene su velocidad constante durante el descenso, el caudal desplazado por unidad de tiempo tampoco varía. Esto implica que a medida que la pieza se aproxima al Teflón, se aumenta la velocidad a la que la resina se mueve hacia el lateral ya que se sigue desplazando el mismo caudal de resina (el empujado por la pieza) pero cada vez circula por una sección lateral menor (debido a la reducción de altura dy). A continuación, en la figura 6.5, se comparan dos instantes distintos donde se puede observar que al descender la pieza, la resina tiene menor espacio para fluir.

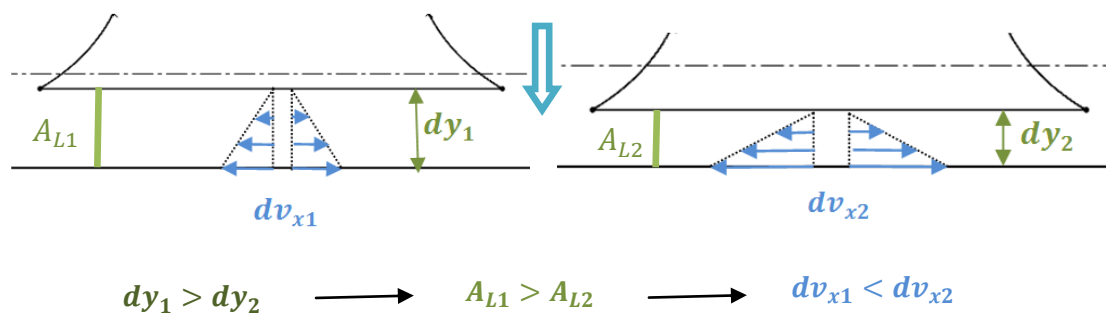


Fig. 6.5. Comparación de dos instantes de aproximación de la pieza al Teflón.
Fuente: Propia.

Así que, a medida que la pieza se aproxima al Teflón, se aumentan las tensiones tangenciales y, en consecuencia, la fuerza de rozamiento. Por lo tanto, la resistencia que se ofrece al descenso de la plataforma se debe a una fricción entre la resina y el Teflón, como se muestra en la figura 6.6.

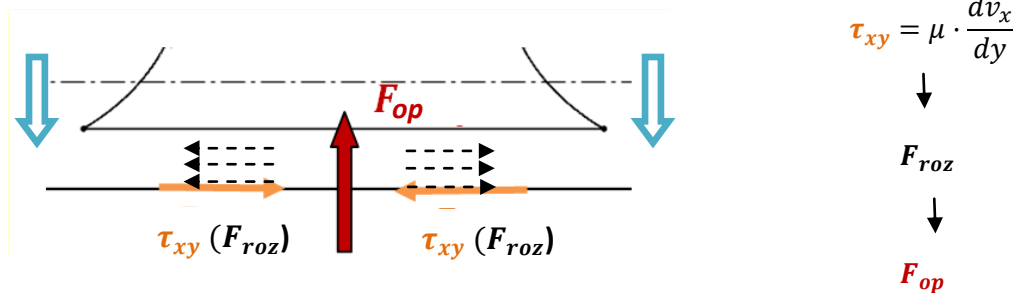


Fig. 6.6. Esquemático de las fuerzas que aparecen cuando la pieza se aproxima al Teflón. Las flechas discontinuas indican la dirección del flujo de resina

Fuente: Propia.

Así que, se puede concluir que la fuerza de oposición al descenso de la plataforma será mayor conforme la pieza se acerque más al Teflón. Para disminuir esta fuerza de oposición, se suelen utilizar mecanismos de inclinación de la cubeta, para que la resina fluya mejor y aparezcan menos tensiones tangenciales. Si no se disponen de estos mecanismos, se recomienda reducir la velocidad de la plataforma para que ésta desplace menos caudal de resina y, por lo tanto, se reduzca la fuerza de rozamiento.

6.5 Tensiones debidas a la fuerza de compresión

Como se ha visto en el punto anterior, hay una fuerza que se opone al descenso de la pieza. Inicialmente se ha supuesto la plataforma aplicará a la pieza un esfuerzo vertical de compresión hasta que la parte inferior de la pieza llegue a la altura deseada respecto del Teflón. Por lo tanto, y de la misma forma que se ha considerado para las tensiones a tracción, se ha supuesto que dicho esfuerzo tiene una distribución uniforme sobre la sección transversal, lo que provoca que las tensiones a compresión generadas en cada sección también tengan una distribución uniforme.

Por otro lado, también se ha tomado la misma hipótesis inicial que para las tensiones a tracción, considerar que la pieza únicamente recibirá esfuerzos normales a la superficie que supondrán tensiones normales a compresión, negligiendo la componente tangencial.

Dicho esto, las tensiones de compresión se analizan de la misma forma que las de tracción, únicamente teniendo en cuenta que en este caso la resina se comprime en vez de traccionarse. Así que, considerando que dicha fuerza de compresión tendrá un módulo menor que la de separación (ya que opone una mayor resistencia la adhesión de la resina con el Teflón que su la fuerza de rozamiento surgida al fluir la resina), si la pieza resiste las tensiones a tracción, seguro que resistirá los de compresión. Es por ello que el proceso experimental se ha hecho en base a las tensiones a tracción, ya que una pieza no se fracturará durante la impresión debido a la compresión de fibras.

No obstante, esta fuerza de compresión no se debe pasar por alto, ya que al ser ejercida tantas veces y en oposición a la fuerza de separación puede provocar, dependiendo de la forma de la pieza, que dicha pieza se fatigue o sufra una pequeña deformación haciéndola inservible (dependiendo de su aplicación).

6.6 Fuerza debida a la recirculación de resina

Por último, es necesario comentar cómo puede afectar la recirculación de la resina tanto cuando es empujada por la pieza en el descenso de la plataforma, como cuando la plataforma se desplaza hacia arriba. Tanto en el proceso de ascenso como en el de descenso de la plataforma, se produce una circulación de la resina líquida por el interior de la cubeta, pudiendo provocar la aparición de fuerzas transversales que podrían llegar a deformar la pieza, si esta presenta secciones muy pequeñas. En este caso, no importa que la suma de pequeñas secciones sea suficientemente elevada, sino que, si se realiza la impresión de soportes en forma de columna de muy poca sección, la fuerza debida a la recirculación de la resina puede llegar a ser significativa y deformar dichos soportes, aunque la suma de sus áreas sea suficiente.

La recirculación de la resina depende de un gran número de parámetros y es prácticamente imposible determinar dicho flujo y, por lo tanto, las fuerzas que genera. No obstante, hay que tenerla en cuenta a la hora de diseñar soportes extremadamente delgados, ya que pueden sufrir deformaciones transversales, como se ha comentado.

6.7 Consideraciones a la hora de imprimir

Una vez analizadas las fuerzas que surgen durante la impresión, es necesario entender los factores que hacen aumentar dichas fuerzas, para intentar reducirlas al máximo. A continuación se describen una serie de consideraciones [26] que hay que tener en cuenta a la hora de realizar la impresión de cualquier pieza.

- **La velocidad de elevación incrementa la fuerza de separación.** La fuerza de separación aumentará como mayor sea la velocidad con la que se eleve la plataforma de construcción. Por lo tanto, siempre se puede reducir la velocidad para favorecer la impresión, a pesar del aumento de tiempo. Esto viene demostrado por la siguiente ecuación, donde la masa representaría la carga que debe vencer la plataforma:

$$F_p = m \cdot v_p$$

- **La velocidad de descenso incrementa la fuerza de compresión.** Como ya se ha visto, reducir dicha velocidad implica desplazar menos caudal de resina y, por lo tanto, que aparezcan menos esfuerzos tangenciales.
- **La fuerza de succión generada en os modelos huecos.** Es necesario realizar orificios en la base de modelos huecos, ya que de esta forma prácticamente se eliminara la fuerza de succión generada, como ya se ha visto en puntos anteriores. Además, estos orificios permitirán canalizar la resina líquida para que no quede atrapada dentro del modelo mientras se está realizando la impresión.
- **Evitar grandes superficies de sección.** Como se ha comentado en puntos anteriores, áreas de sección grandes hacen aumentar la fuerza de separación. Estas áreas de sección se pueden reducir reorientando el modelo, además de haciéndolo hueco.
- **Incluir una base en el modelo.** Es necesario incluir una base de unas décimas de milímetro para asegurar que la pieza se adhiera correctamente a la plataforma de construcción durante todo el proceso de impresión, como se verá en los siguientes puntos.
- **Exponer las primeras capas a más tiempo de curado.** Es necesario incrementar el tiempo de exposición a la luz UV para las primeras capas con el objetivo de que dichas capas se adhieran aún más a la plataforma.

- **Exponer las estructuras base a más tiempo de curado.** Igual que en el punto anterior, es recomendable incrementar el tiempo de exposición para ciertas estructuras base que sean cruciales para mantener la pieza en pie.
- **Añadir más resina a la cubeta si es necesario.** Hay que tener en cuenta que la cubeta debe contener un 20% más de resina del volumen de la pieza a obtener.
- **La velocidad de impresión.** Visto los puntos anteriores, para aumentar la velocidad de impresión, el tiempo de exposición debería disminuir mientras que la velocidad de elevación de la plataforma debería aumentar. Pero si estos dos parámetros son excesivos, la impresión fallará.

Por otro lado, también se tienen que tener en cuenta una serie de indicaciones relacionadas con las propiedades del proyector, para obtener las piezas con la calidad deseada.

- **La resolución no es uniforme para toda la sección proyectada.** La resolución es menor en las esquinas de la imagen proyectada.
- **Intensidad y tiempo de exposición inversamente proporcionales.** Hay que tener en cuenta con la intensidad que se proyecta la imagen de cada capa, ya que cuanto menor sea, necesitará un mayor tiempo de curado. Así que el tiempo de curado será estimado dependiendo del área proyectada por capa.
- **A mayor área de proyección, menor intensidad de la luz proyectada.** Por lo tanto, y teniendo en cuenta el punto anterior, cuanto mayor sea el área proyectada, se necesitará de un tiempo mayor de curado.

7. PREPARACIÓN DEL MODELO

7.1 Orientación del modelo

Una vez analizadas las características del proceso de impresión, es muy importante orientar el modelo antes de imprimirlo teniendo en cuenta una serie de criterios, ya que dicha orientación puede ser determinante para que una impresión se realice de forma satisfactoria o no.

En el proceso experimental realizado, no se ha orientado la pieza de forma óptima ya que lo que se quiere buscar es una relación mínima de áreas y la distancia que debe haber entre soportes para garantizar una correcta impresión, como se detallará más adelante. Además, de esta forma se podrá ver (según los resultados obtenidos) de manera más pronunciada las fuerzas que actúan. No obstante, se explicará la importancia de orientar los modelos a imprimir y en que se basan dichas orientaciones, ya que es una parte fundamental en las impresiones realizadas mediante la tecnología DLP. Además, se orientará una pieza real en base a la combinación de distintos criterios.

7.1.1 Orientación en base a la reducción de fuerzas de impresión

Uno de los principales objetivos de la orientación de un modelo es reducir las fuerzas surgidas durante el proceso de impresión. Como se ha comentado en puntos anteriores, cuanto mayor sea el área proyectada por capa, mayor serán los esfuerzos de separación y compresión que recibirá la pieza. Por lo tanto, reduciendo el área transversal de cada capa, se reducirán dichos esfuerzos, y esto se puede conseguir rotando la pieza un cierto ángulo respecto al plano horizontal. A continuación, en la figura 7.1, se muestra la orientación de una pieza en base a este criterio, señalando las distintas capas.

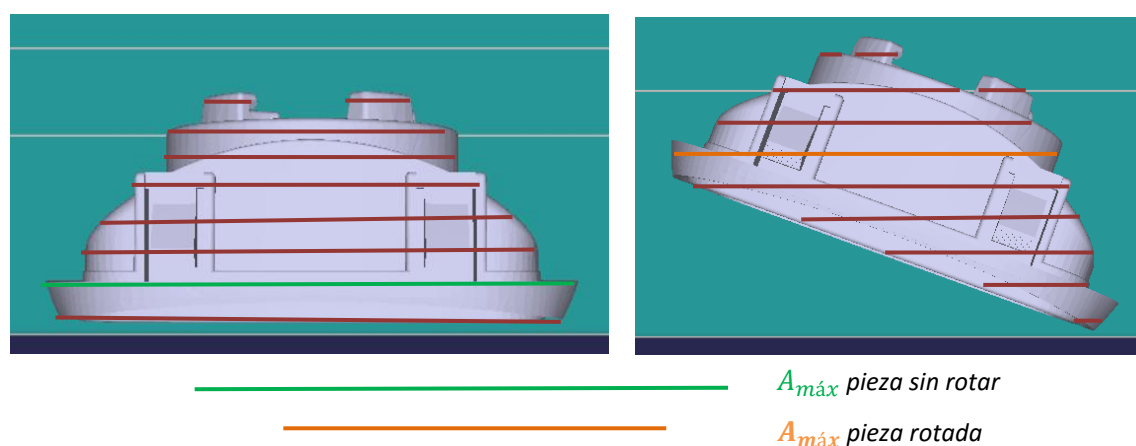


Fig. 7.1. Pieza rotada un cierto ángulo respecto el plano horizontal, donde se señalan una serie de capas representativas. En azul más oscuro, debajo de la pieza, se tiene la plataforma de construcción. En la parte inferior de las imágenes, comparación del área de capa máxima de ambas piezas.

Fuente: Propia. *Software utilizado:* B9Creator

En la figura 7.1 se puede observar que inclinando el modelo un cierto ángulo (en este caso unos 20 grados), se consigue reducir considerablemente el área transversal máxima de la pieza, que como se ha visto en puntos anteriores, es la que determina la fuerza de separación y compresión máxima que se llevará a cabo en el proceso de impresión. Por contra, esta rotación implica un aumento en la altura de la pieza, lo que supone un mayor tiempo de impresión, por lo tanto, no se deberá rotar la pieza en exceso. Además, un aumento considerable de la altura, y en el caso de que fueran necesarios la colocación de soportes, estos deberían ser más largos y, por lo tanto, más débiles.

En conclusión y en base a este criterio, hay que orientar la pieza en busca de la mejor relación entre el área mínima por capa y la altura total de la pieza.

7.1.2 Orientación en base a la colocación de soportes

La colocación de las estructuras de soporte va a depender totalmente de la orientación de la pieza. Por lo tanto, además de orientar la pieza para buscar la mejor relación área por capa-altura, también hay que intentar optimizar el uso de las estructuras de soporte. Esta segunda orientación se puede realizar rotando la pieza en cualquiera de sus ejes.

En primer lugar, hay que intentar utilizar las mínimas estructuras de soporte posibles, ya que dificultan el post-procesado y pueden llegar a dañar la pieza si no se diseñan correctamente. Dicho esto, hay que orientar la pieza en busca de que haya el menor área que requiera del uso de soportes. Aunque, claro está, a la vez hay que tener en cuenta todos los aspectos comentados en el punto anterior.

En segundo lugar, hay que elegir con criterio las áreas donde van a ir situados los soportes, ya que si hay ciertas zonas del modelo con alto grado de detalle, es necesario evitar la colocación de soportes en estas zonas ya que a la hora de eliminarlos pueden marcar la pieza, haciendo así perder toda la calidad que te ofrece este tipo de impresión.

A continuación, en la figura 7.2, se muestra la reorientación de la pieza mostrada en la figura 7.1 con el objetivo de cumplir los criterios que se acaban de citar, además del expuesto en el punto anterior.

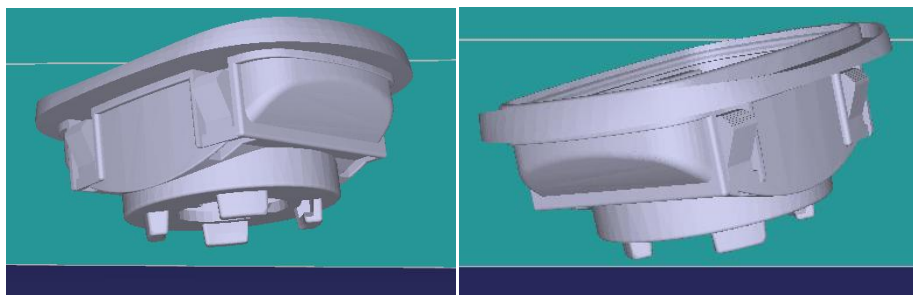


Fig. 7.2. Pieza reorientada para cumplir los distintos criterios de orientación.

Fuente: Propia. *Software utilizado:* B9Creator

En la figura 7.2 se ha orientado la pieza de la forma más óptima siguiendo todos los criterios expuestos hasta ahora. En primer lugar, se ha orientado la pieza boca arriba ya que se desea que el interior de dicha pieza tenga un alto grado de detalle, evitando de esta manera el uso de soportes en su interior. Seguidamente, se ha rotado la pieza respecto a su eje vertical con el objetivo de reducir el área de cada capa.

Finalmente, se ha rotado la pieza respecto a su eje horizontal para disminuir el área de contacto con los soportes. Cabe decir que este último paso se ha realizado con el software *Meshmixer*, ya que es capaz de indicar de forma automática las áreas que deben ser soportadas. Más adelante se mostrará el funcionamiento básico de dicho software. En definitiva, unificando todos los criterios expuestos, se ha obtenido esta orientación que se cree que es la más óptima.

7.1.3 Otros aspectos importantes de la orientación del modelo

Además de orientar los modelos en base a los criterios expuestos en los dos apartados anteriores, hay otra razón por la cual es imprescindible orientar las piezas, la circulación de resina. Si se lleva a cabo la impresión de una pieza con una superficie relativamente grande paralela a la plataforma de construcción, además de incrementarse el aumento de las fuerzas de impresión, esta capa no quedará completamente lisa debido a un estancamiento en la resina. Al no estar rotada la pieza y no haber ningún mecanismo de inclinación en la cubeta, la resina de su interior apenas se desplaza y esto implica que la resina cercana a la luz UV quede afectada y que la pieza tenga una serie de imperfecciones.

La pieza escogida en el proceso experimental que se ha llevado a cabo, no se le ha realizado ningún tipo de rotación, entre otras cosas, ver cómo afecta este fenómeno.

7.2 Creación de una base para el modelo

Para las impresiones realizadas mediante la tecnología DLP, no es nada recomendable que la base de la pieza se adhiera directamente sobre la plataforma de construcción, ya que sería muy difícil retirar la pieza de dicha plataforma sin que sufra ningún daño. Además, las piezas que no presentan mucha área en la base, seguramente no serían capaces de resistir las fuerzas generadas durante el resto del proceso de impresión.

Como solución, se añade al modelo una base de unos pocos milímetros que se adherirá a la plataforma de construcción. Sobre dicha base surgirán los soportes sobre los que se aposentará la pieza. Es necesario tener en cuenta su grosor, ya que una base poco gruesa afectará a la estabilidad de los soportes, mientras que una base muy gruesa dificultará su posterior retirada de la plataforma. Además del control de su grosor (el cual se recomienda entre 1 y 2 mm), su superficie debe abastecer la proyección de la pieza en la plataforma. A continuación, en la figura 7.3, se muestra la adición de una base en la pieza de la figura 7.2.

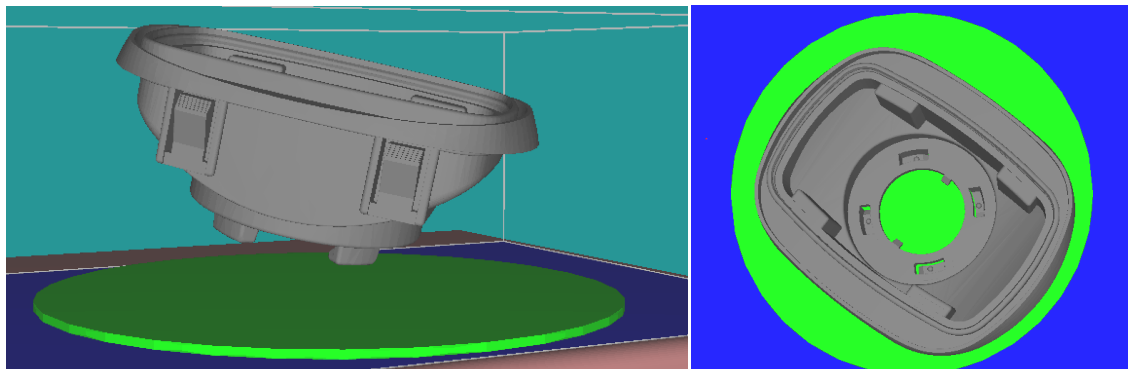


Fig. 7.3. Pieza con una base (en verde) de 1mm. A la izquierda vista en perspectiva. A la derecha vista en planta

Fuente: Propia. *Software utilizado:* B9Creator

En la figura 7.3 se puede observar como la base del modelo cubre con la proyección de la pieza en la plataforma.

8. ESTRUCTURAS DE SOPORTE

8.1 Localización de las zonas que deben ser soportadas

Como se comentado a lo largo del proyecto, las estructuras de soporte tienen como función principal ayudar a formar la primera capa de una superficie al voladizo o con un ángulo cerrado respecto al plano horizontal. Cabe decir que la base de la pieza se considera que está al voladizo debido a que no se construye directamente sobre la plataforma.

Así que, una vez se ha orientado la pieza de la manera más óptima, es necesario analizar aquellas zonas dónde deberán colocarse las estructuras de soporte, además de la parte inferior de la pieza. Para la LUX (de tecnología DLP), será necesario utilizar estructuras de soporte para piezas con un voladizo de longitud superior a unos pocos milímetros y para ángulos entre la superficie de la pieza y el plano inferiores a 45° . Estas zonas pueden ser localizadas por el software, únicamente introduciendo estos dos parámetros. A continuación, en la figura 8.1, se muestra un ejemplo de cómo el software utilizado (MeshMixer) señala las zonas dónde será necesaria la colocación de soportes en la pieza orientada del punto anterior.

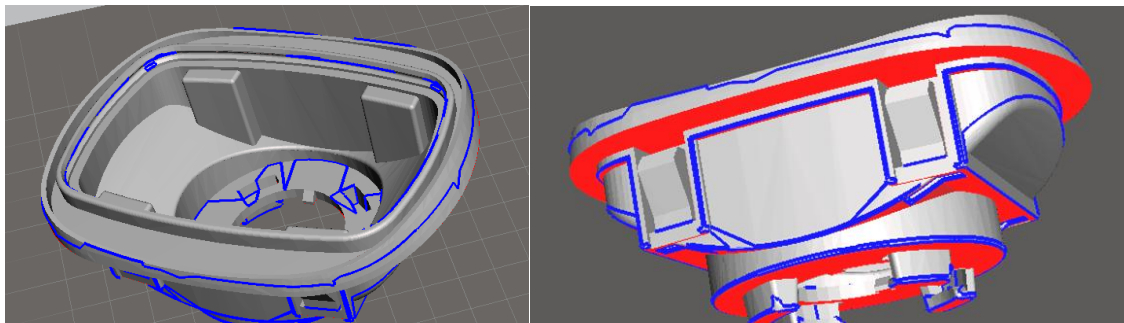


Fig. 8.1. Indicación ofrecida por el software sobre dónde colocar los soportes en una pieza previamente orientada.

Fuente: Propia. *Software utilizado:* MeshMixer

A la hora de colocar los soportes, estos deben cumplir una distancia mínima entre ellos para que se pueda formar la capa. Es precisamente esta distancia mínima uno de los parámetros que se quiere determinar mediante el proceso experimental.

8.2 Condiciones para el diseño de los soportes

Además de la función principal de ayudar a formar las primeras capas al voladizo, las estructuras de soporte tienen que cumplir una serie de requisitos con el objetivo de que no se desmorone la impresión y que se obtenga la pieza con la calidad deseada.

Por un lado, las estructuras de soporte deben mantener la estabilidad mecánica de los modelos impresos, es decir, deben ser capaces de resistir las fuerzas de separación y de compresión que hace la plataforma de construcción. Como se ha comentado en otros puntos del proyecto, la tecnología DLP necesita unos soportes bastante resistentes ya que las fuerzas generadas durante la impresión son mayores que en otras tecnologías. Por lo tanto, dichos soportes no podrán ser tan esbeltos como los que se suelen utilizar en la tecnología SLA. Además, hay que tener en cuenta que los soportes relativamente altos pueden sufrir el pandeo, provocando que estos se fracturen y, en consecuencia, que la impresión se desmorone. Por lo tanto, si es necesario utilizar soportes relativamente largos, estos deberán ser más gruesos o se deberán unir entre ellos formando una estructura que compense las tensiones surgidas por dicho pandeo.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que las estructuras de soporte pueden marcar la pieza al retirarlas. Por lo tanto, es necesario reducir al máximo el contacto entre la superficie de los soportes y la pieza. No obstante, deben tener una área mínima respecto la sección máxima de la pieza para que puedan resistir satisfactoriamente todas las tensiones surgidas durante el proceso de impresión. Es precisamente esta relación de áreas (la de la punta de los soportes respecto a la capa con más sección de la pieza) la que también se intentará determinar mediante el proceso experimental.

8.3 Tipos de soportes

Una vez claras la localización y las condiciones que deben cumplir los soportes, hay que elegir qué tipo de soporte utilizar. Se puede escoger entre distintas formas, que varían según el software utilizado. A continuación, en la figura 8.2, se muestran algunos tipos que ofrece el software *B9Creator*.

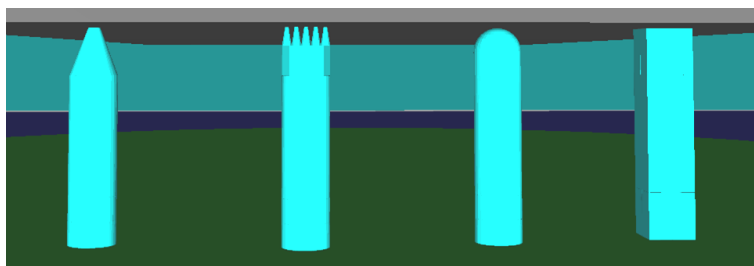


Fig. 8.2. Cuatro tipos de soportes que ofrece el software B9Creator.

Fuente: Propia. *Software utilizado:* B9Creator

A partir de los tipos de soportes ofrecidos, se ha escogido el que se cree más idóneo para ser usado.

En primer lugar, se ha descartado el soporte de punta esférica (el tercero empezando por la izquierda mostrado en la figura 8.2), ya que aunque es cierto que el software permite un cierto control de la penetración de dicho soporte en la pieza, la forma esférica de la punta hace pasar de una insuficiente a una excesiva de área de contacto por un mínimo exceso en la penetración del soporte en la pieza.

En segundo lugar, se ha prescindido del uso del soporte de forma cúbica, mostrado también en la figura 8.2, ya que aunque en este caso sí que se tenga un control total del área de contacto, ésta se verá determinada por el grosor de la parte central del soporte. Así que, no es nada recomendable el uso de soportes sin una reducción del área en la punta respecto a la del cuerpo. Cabe decir que tampoco es recomendable que dicha reducción de área se realice de forma brusca, ya que esto haría que hubieran más zonas de poca área respecto al área máxima de la pieza. Por lo tanto, el cambio de diámetro del cuerpo a la punta debe ser progresivo.

Finalmente, se ha escogido el soporte de punta cónica descartando así el que está compuesto por pequeñas puntas en la parte superior. Los motivos de esta elección han sido, por un lado, el mayor control de área de contacto que ofrece el soporte de punta cónica. Por otro lado, se cree que el soporte compuesto por las puntas en la parte superior proporcionará una menor estabilidad mecánica y según la orientación de la pieza, puede que aparezcan secciones con muy poca área aumentando así las posibilidades de que la impresión sea fallida. Además, cabe decir que el software utilizado por la LUX, el *CreationWorkshop*, únicamente ofrece los soportes de punta cónica, lo cual hace reforzar las hipótesis que se han tomado para elegir el soporte más adecuado y, por lo tanto, el que se utilizará en el proceso experimental.

Respecto al uso de soportes, hay que tener en cuenta que éstos no son únicamente externos, es decir, también puede que sea necesario la colocación de soportes entre dos superficies de la pieza. Por lo tanto, los dos extremos del soporte utilizado estarán en contacto con la superficie de la pieza y habrá que tenerlo en cuenta.

A continuación, en la figura 8.3, se muestra un ejemplo del uso de soportes internos y cómo sus dos extremos están acabados en punta.

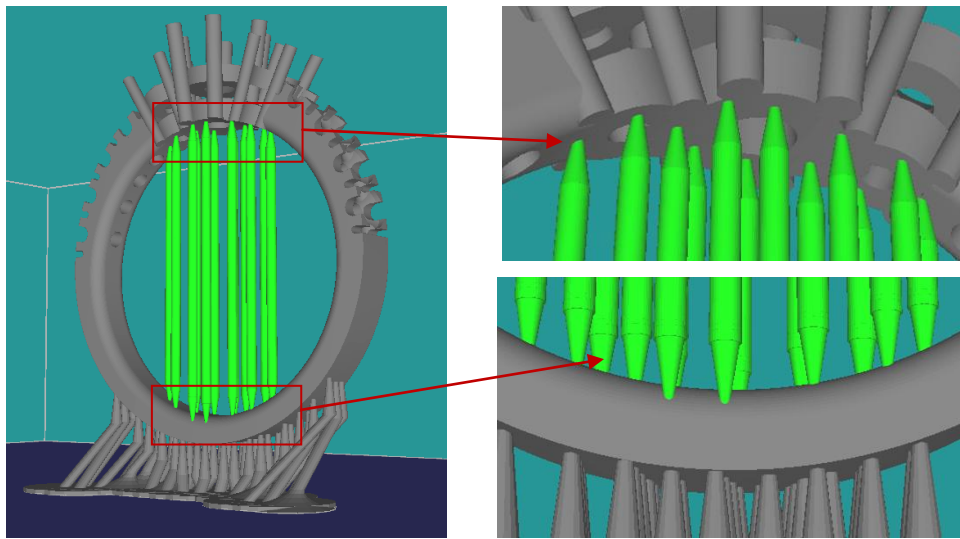


Fig. 8.3. Pieza de joyería con soportes internos. Las dos imágenes de la derecha muestran los soportes en detalle.

Fuente: Propia. *Software utilizado:* B9Creator

En conclusión, una correcta impresión depende totalmente de que las estructuras de soporte tengan todas las características comentadas anteriormente, ya que son las que permiten obtener todo tipo de piezas. De aquí surge la importancia del estudio de las estructuras de soporte, y su consiguiente optimización.

9. EXPERIMENTACIÓN

9.1 Objetivos

El objetivo principal de la experimentación es garantizar una correcta impresión de cualquier pieza mediante una serie de parámetros que se intentarán determinar. Cómo se ha comentado en puntos anteriores, lo que determina una impresión satisfactoria es, por un lado, la relación de áreas entre la sección mínima de los soportes y la sección máxima de la pieza una vez orientada. Por otro lado, otro parámetro importante a determinar es la distancia máxima que puede haber entre soportes para que se pueda formar tanto la primera capa de la pieza, como cualquier superficie al voladizo sin que se deforme. Así que, estos dos parámetros serán los más determinantes de cada prueba.

Dicho esto, se ha considerado que la mejor forma de determinar estos parámetros será variando tanto el área de punta, como la distancia entre soportes. Dichas pruebas se han realizado en una pieza rectangular paralela respecto a la plataforma, tal y como se muestra en la figura 9.1. Se ha escogido esta pieza sin orientar tanto para simplificar los cálculos, como para que las fuerzas de impresión sean más pronunciadas y de esta forma poder analizar con más claridad su comportamiento sobre la pieza.

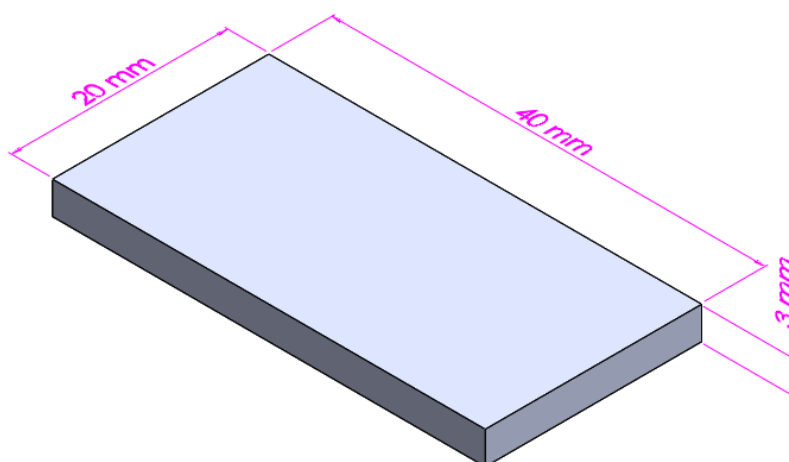


Fig. 9.1. Pieza probeta utilizada en la experimentación.

Fuente: Propia. *Software utilizado:* SolidWorks

Dicha pieza tiene un área de sección de 800 mm^2 .

Además de los dos objetivos principales, mediante esta experimentación se podrá comprobar si las fuerzas de impresión planteadas son correctas y si el diámetro de punta escogido, además de aguantar el proceso de impresión, deja marcada la pieza al retirarlo.

9.2 Proceso experimental

A partir de la pieza probeta mostrada en la figura 9.1, se ha llevado a cabo la colocación de soportes variando la distancia entre ellos y el diámetro de su punta. La forma escogida para los soportes es de cuerpo cilíndrico (que mantendrá constante su diámetro en todas las pruebas) y de punta cónica. Las razones de por qué se ha optado por este tipo de soportes se han explicado en el apartado 8.3. Además, el software de la LUX (*CreationWorkshop*) ofrece este tipo de soportes, así que se ha utilizado este software para su creación. Por otro lado, el *CreationWorkshop* ofrece una ventaja respecto a los otros softwares, y es que permite un control exacto de la distancia existente entre soportes, además de hacerlos completamente verticales y poder variar libremente el diámetro de punta en contacto con la pieza.

Se tiene pensado realizar la impresión de cuatro piezas, las dos primeras coincidirán en la distancia entre soportes (distancia entre centros) y, por lo tanto, en el número de soportes utilizados. Se diferenciarán por el diámetro de punta de dichos soportes, que será lo que determinará el área de sección mínima del conjunto pieza-soportes.

Por otro lado, la distancia entre los soportes empleados en las dos piezas restantes también coincidirán, pero dicha distancia será diferente que para los dos primeros casos. Igual que para las dos primeras piezas, estas también se diferenciarán por el diámetro de punta de los soportes.

En definitiva, teniendo dos parámetros (distancia entre soportes y diámetro de punta) a dos niveles cada uno, salen las cuatro piezas que se acaban de explicar, manteniendo constante el diámetro del cuerpo del soporte en todas ellas. A continuación se muestra una tabla con los valores de dichos parámetros.

	Pieza probeta 1	Pieza probeta 2	Pieza probeta 3	Pieza probeta 4
Distancia entre soportes	5mm	5mm	10mm	10mm
Diámetro de punta	0.2mm	0.4mm	0.2mm	0.4mm
Diámetro de cuerpo	1mm	1mm	1mm	1mm

Tabla 9.1. Características principales que definen las cuatro piezas probeta

La elección de los valores de los parámetros mostrados en la tabla 9.1, se ha realizado por diversos motivos. En primer lugar y por lo que respecta a la distancia entre soportes, los valores escogidos permiten una repartición simétrica de los soportes por toda la superficie de la pieza. Además, al ser una distancia el doble que la otra, hace que el número de soportes sea significativamente superior en los dos primeros casos.

Por otro lado, los valores del diámetro de punta escogidos también uno es el doble que el otro, para que las áreas de sección mínima se diferencien de forma significativa. Además, se han elegido estos valores para hacer coincidir dos áreas mínimas de dos piezas con distinta distribución de soportes, como se muestra en la siguiente tabla.

	Pieza probeta 1	Pieza probeta 2	Pieza probeta 3	Pieza probeta 4
Nº de soportes N_s	32	32	8	8
Área de punta $A_p = \pi \cdot R_p^2$	0.03 mm ²	0.126 mm ²	0.03 mm ²	0.126 mm ²
Área de sección mínima $A_T = N_s \cdot A_p$	1 mm ²	4.02 mm ²	0.25 mm ²	1 mm ²

Tabla 9.2. Características principales de las cuatro piezas probeta derivadas de la Tabla 9.1

Como se puede observar, las piezas 1 y 4 tienen la misma área de sección mínima pero distribuida de manera muy distinta. Esto será útil para comprobar cómo afecta la distancia entre soportes a pesar de tener la misma área de sección mínima. Las dos piezas restantes (2 y 3), son los casos más extremos, tanto en el número de soportes empleados como en el área de sección mínima. En principio se espera que la pieza 2 aguante satisfactoriamente el proceso de impresión, mientras que la pieza 3 no.

Una vez definidas las cuatro piezas probeta, se ha procedido a su diseño y a la determinación de los parámetros que definirán el proceso de impresión mediante el software *CreationWorkshop*, que se detalla en el siguiente punto.

9.3 Definición del proceso de impresión

Una vez definidos los parámetros de las piezas probeta, se han diseñado dichas piezas teniendo en cuenta todas las características comentadas en el punto anterior. Los únicos parámetros que faltaban por determinar eran la altura de los soportes y de la base del modelo. Se ha definido una altura de **10mm** para los soportes y de **1mm** para la base del modelo. Estos valores se han escogido por varios motivos. En primer lugar, no se deseaba que los soportes fueran largos para evitar el pandeo y de esta forma hacer un diseño de experimentos más robusto. Por otro lado, y como se ha comentado en otros puntos del proyecto, es la altura total de la pieza lo que determina el tiempo de impresión (considerando una altura de capa constante). Así que, no se querían tiempos excesivos de impresión debido a la alta ocupación que tiene la impresora.

De este modo, se tenían las piezas completamente definidas. A continuación, en las figuras 9.2 y 9.3, se muestran dos de ellas que representan los dos valores de distancia entre soportes y de diámetro de punta.

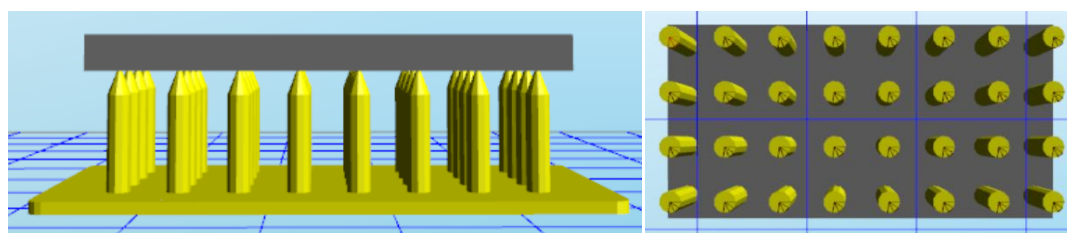


Fig. 9.2. Vista frontal y desde abajo del CAD de la pieza probeta 1.

Fuente: Propia. *Software utilizado:* CreationWorkshop

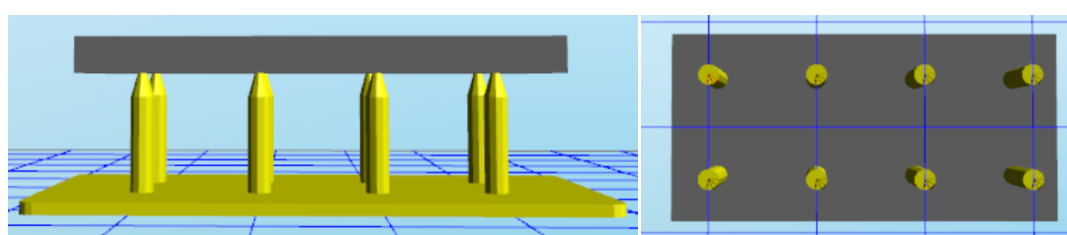


Fig. 9.3. Vista frontal y desde abajo del CAD de la pieza probeta 4.

Fuente: Propia. *Software utilizado:* CreationWorkshop

Una vez diseñadas las piezas, únicamente falta determinar los parámetros que definen el proceso de impresión y que generarán el GCode y la división de la pieza por capas, tal y como se ha explicado en el punto 5.6. A continuación, en la tabla 9.3, se muestran los valores que se han determinado para llevar a cabo el proceso de impresión.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Grosor de capa	0.1 mm	Altura de elevación	5 mm
Tiempo de exposición por capa	2500 ms	Tiempo de exposición para las primeras capas	15000 ms
Número de capas expuestas a mayor tiempo	110	Duración de una secuencia	10600 ms.
Velocidad de elevación	50 mm/min	Velocidad de descenso	100 mm/min

Tabla 9.3. Parámetros que determinan el proceso de impresión

Los valores mostrados en la tabla 9.3 se han seleccionado por recomendación del personal encargado de la impresora, ya que se consideran los más adecuados para que la impresión sea satisfactoria en el menor tiempo posible. Uno de los valores que he seleccionado personalmente ha sido el grosor de capa, el cual podría ser mucho menor (hasta 0.025mm). El motivo de esta decisión ha sido debido a la forma tan simple de la pieza, es decir, al no ser necesario un elevado grado de detalle para que la impresión sea de calidad, tampoco es necesario utilizar un grosor de capa muy fino, ya que además de no influir en las fuerzas surgidas en la impresión, supondría un incremento significativo del tiempo de impresión. El otro valor seleccionado a consciencia es el número de capas a mayor tiempo, las cuales se han hecho coincidir con la base y los soportes de la pieza.

Una vez definido los parámetros que determinan el proceso de impresión, el software es capaz de generar el GCode, además de dividir la pieza en capas. Como resultado, se ha obtenido una división de la pieza en **140 capas** y se ha estimado que el proceso de impresión durará **53.29 minutos** para cada pieza.

Para todas las piezas, se ha realizado la siguiente división de capas:

- La base del modelo se ha dividido en 10 capas
- Los soportes se han dividido en 100 capas
- La pieza se ha dividido en 30 capas

En las cuatro figuras siguientes, se muestran las capas más representativas de la pieza probeta 1 ofrecidas por el software.



Fig. 9.4. Capa 1, correspondiente a la base del modelo de la pieza 1.

Fuente: Propia. *Software:* CreationWorkshop



Fig. 9.5. Capa 11, correspondiente a la base de los soportes en contacto con la base del modelo de la pieza 1.

Fuente: Propia. *Software:* CreationWorkshop

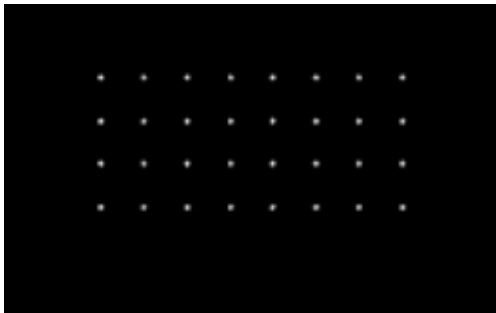


Fig. 9.6. Capa 110, correspondiente a punta del soporte de la pieza 1, de diámetro 0.2mm

Fuente: Propia. *Software:* CreationWorkshop



Fig. 9.7. Capa 111, correspondiente a la base de la pieza rectangular 1.

Fuente: Propia. *Software:* CreationWorkshop

En las cuatro figuras siguientes, se muestran las capas más representativas de la pieza probeta 4 ofrecidas por el software.



Fig. 9.8. Capa 1, correspondiente a la base del modelo de la pieza 4.

Fuente: Propia. *Software:* CreationWorkshop

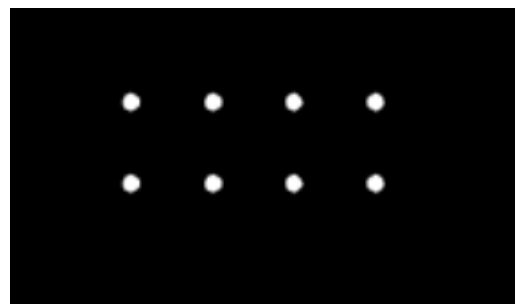


Fig. 9.9. Capa 11, correspondiente a la base de los soportes en contacto con la base del modelo de la pieza 4.

Fuente: Propia. *Software:* CreationWorkshop

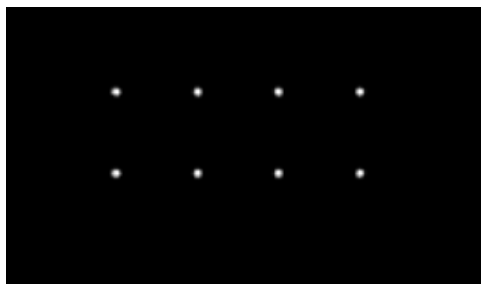


Fig. 9.10. Capa 110, correspondiente a punta del soporte de la pieza 4, de diámetro 0.4mm
Fuente: Propia. *Software:* CreationWorkshop



Fig. 9.11. Capa 111, correspondiente a la base de la pieza rectangular 2.
Fuente: Propia. *Software:* CreationWorkshop

De las figuras mostradas, se puede hacer un par de observaciones. En primer lugar, se puede ver claramente como varía la distribución de soportes entre las figuras 9.5 y 9.9, que corresponden a las piezas 1 y 4 respectivamente. Además se puede ver que el diámetro del cuerpo del soporte no varía en estas dos figuras. En cambio, comparando las figuras 9.6 y 9.10, se puede apreciar cómo área de la punta de los soportes es distinta, sin embargo, la suma de áreas de ambas figuras es la misma, cómo se ha visto en la tabla 9.2.

9.4 Resultados obtenidos

En este punto se mostrarán los resultados obtenidos mediante la impresión de las piezas. Posteriormente y analizando dichos resultados se realizarán unas conclusiones dónde se podrá ver si las fuerzas de impresión se han planteado correctamente y si se pueden considerar los resultados como válidos para el resto de pruebas.

9.4.1 Pieza probeta 1

Distancia entre soportes	5 mm
Número de soportes	32
Diámetro de punta	0.2 mm
Área de sección mínima	1 mm ²
Relación de áreas teórica	$\frac{800 \text{ mm}^2}{1 \text{ mm}^2}$

Tabla 9.4. Características teóricas de la pieza probeta 1

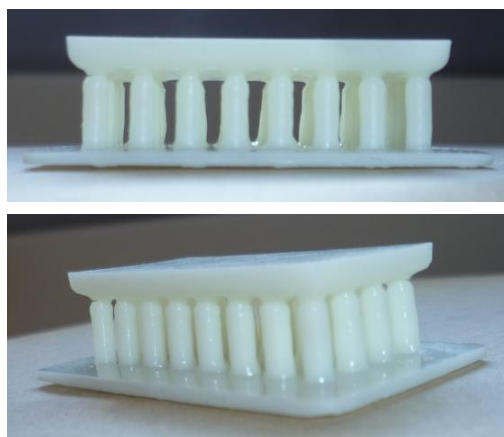


Fig. 9.12. Pieza probeta 1. Arriba, vista frontal. Abajo, vista isométrica.

Fuente: Propia

9.4.2 Pieza probeta 2

Distancia entre soportes	5 mm
Número de soportes	32
Diámetro de punta	0.4 mm
Área de sección mínima	4.02 mm ²
Relación de áreas teórica	$\frac{800 \text{ mm}^2}{4.02 \text{ mm}^2}$

Tabla 9.5. Características teóricas de la pieza probeta 2

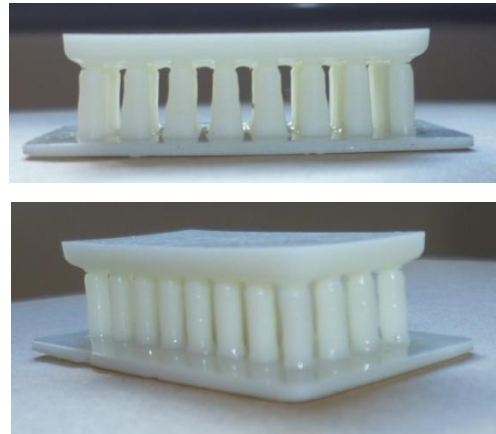


Fig. 9.13. Pieza probeta 2. Arriba, vista frontal. Abajo, vista isométrica.

Fuente: Propia

9.4.3 Pieza probeta 3

Distancia entre soportes	10 mm
Número de soportes	8
Diámetro de punta	0.2 mm
Área de sección mínima	0.25 mm ²
Relación de áreas teórica	$\frac{800 \text{ mm}^2}{0.25 \text{ mm}^2}$

Tabla 9.6. Características teóricas de la pieza probeta 3

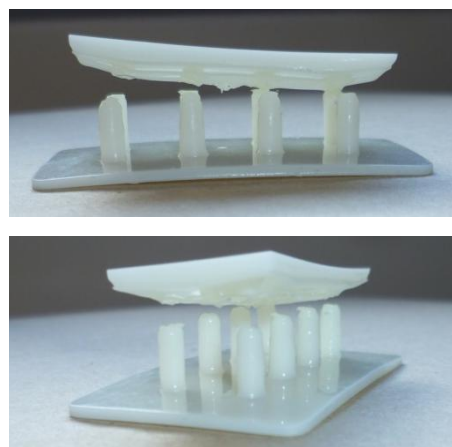


Fig. 9.14. Pieza probeta 3. Arriba, vista frontal. Abajo, vista isométrica.

Fuente: Propia

9.4.4 Pieza probeta 4

Distancia entre soportes	10 mm
Número de soportes	8
Diámetro de punta	0.4 mm
Área de sección mínima	1 mm ²
Relación de áreas teórica	$\frac{800 \text{ mm}^2}{1 \text{ mm}^2}$

Tabla 9.7. Características teóricas de la pieza probeta 4

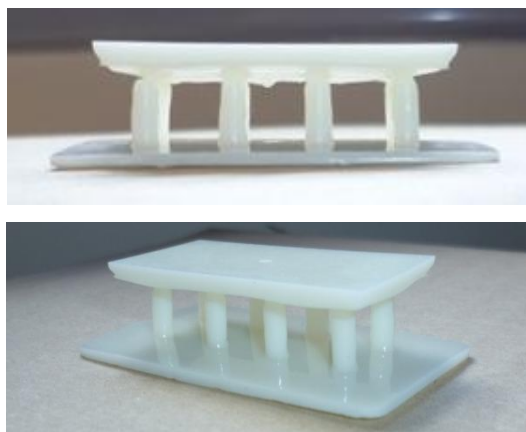


Fig. 9.15. Pieza probeta 4. Arriba, vista frontal. Abajo, vista isométrica.

Fuente: Propia

9.5 Conclusiones del proceso experimental

En base a los resultados obtenidos, se han tomado una serie de consideraciones respecto a los objetivos propuestos en la experimentación.

En primer lugar, se observa que la distancia entre soportes (de 10 mm) de las piezas probeta 3 y 4 es excesiva, ya que se puede apreciar claramente en la vista frontal de las figuras 9.14 y 9.15 cómo la capa de la pieza rectangular en contacto con los soportes no es ni mucho menos plana. Así mismo, en las dos piezas probeta restantes (la 1 y la 2) se puede observar una mayor planitud en dicha capa, tal y como se muestra en la vista frontal de las figuras 9.12 y 9.13. No obstante, en todos los casos dicha capa no presenta una superficie lisa, sino que presentan un relieve en forma de gotas de resina solidificada tal y como se puede observar con más detalle en la figura 9.16.

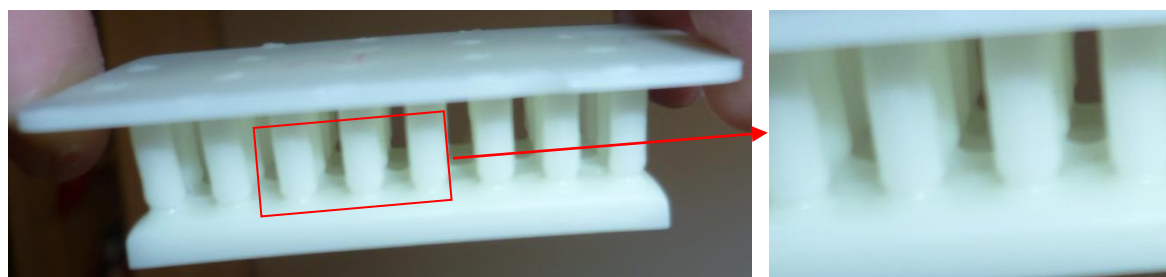


Fig. 9.16. Detalle de la capa en contacto con los soportes de la pieza probeta 2

Fuente: Propia

La principal hipótesis tomada para explicar este fenómeno es el estancamiento de resina provocado por no haber orientado el modelo, explicado en el apartado 7.1.3. Por lo tanto, se concluye que la distancia entre soportes o la distancia de una capa al voladizo debe ser inferior o igual a 5mm, aunque habría que comprobarlo con una pieza correctamente orientada.

En segundo lugar, y por lo que respecta a la relación entre el área de capa máxima y mínima y, por lo tanto, a la capacidad de resistir los esfuerzos de impresión, se puede apreciar claramente en la figura 9.14 que la pieza probeta 3 no ha resistido dichos esfuerzos, provocando la separación de los soportes de la pieza y, en consecuencia, la malformación de la pieza, tal y como se esperaba.

Por otro lado, el resto de soportes sí que han resistido las tensiones surgidas en la impresión, quedando de esta manera totalmente adheridos a la capa inferior de la pieza rectangular, tal y como se aprecia en las figuras 9.12, 9.13 y 9.15. Por lo tanto, se considera que la relación de áreas mínima que se da en las piezas probeta 1 y 4, es suficiente para garantizar que la impresión no se desmoronará.

En definitiva, en base a los resultados obtenidos en esta experimentación se concluye que la distancia mínima entre soportes debe ser igual o inferior a 5 mm, y que la relación de áreas óptima deberá ser superior a la presentada en la pieza probeta 3 e inferior o igual a la presentada en las piezas probeta 1 y 4. Debido al sobredimensionamiento presentado en los soportes y que se detallará a continuación, no se puede concluir ningún valor numérico exacto ya que no se pueden determinar las medidas exactas de las piezas impresas.

Además de estas consideraciones, se han observado una serie de irregularidades repetidas en distintas piezas que se intentarán dar una explicación lógica en el siguiente punto.

9.5.1 Irregularidades en las piezas impresas

Como se puede observar, las piezas no han salido como en un principio de creía que iban a salir, es decir, idénticas a los modelos en CAD. No obstante, las irregularidades surgidas se repiten en las distintas piezas.

En primer lugar, se puede observar claramente que los soportes de todas las piezas obtenidas tienen un diámetro mayor al presentado por el modelo en CAD, el cual era de 1mm. La principal hipótesis que se toma para explicar este fenómeno es la sobreexposición de la resina a la luz UV. Ya que si se expone más tiempo del adecuado, la pieza adquiere unas dimensiones mayores que las del modelo en CAD, como ha pasado en este caso.

A continuación, en la figura 9.17, se muestra la comparación de una pieza con su modelo en CAD, donde se puede ver claramente el cambio de dimensiones experimentado.

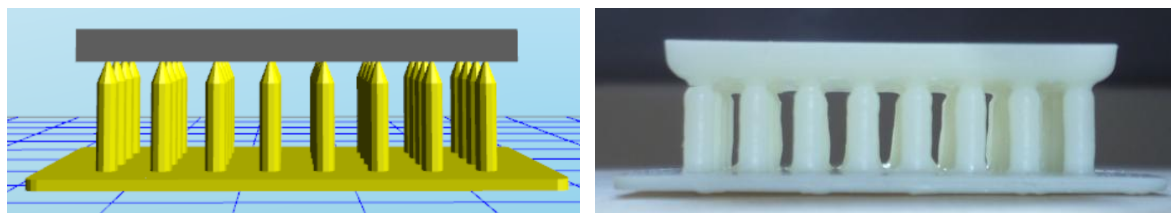


Fig. 9.17. Comparación del modelo en CAD de la pieza probeta 1 (izquierda) con su correspondiente impresión (derecha)

Fuente: Propia

En segundo lugar, se puede apreciar una pequeña deformación de las tres piezas rectangulares que han soportado las fuerzas de impresión (la 1, la 2 y la 4), la cual viene determinada por la no verticalidad de los soportes, como se puede apreciar con más detalle en la figuras 9.18 y 9.19.

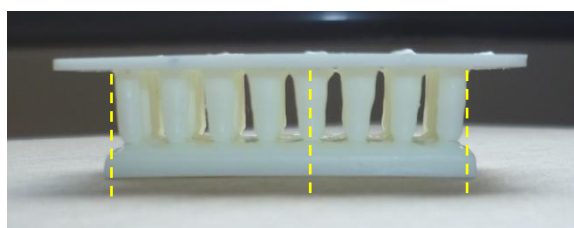


Fig. 9.18. Detalle de la no verticalidad de los soporte de la pieza probeta 2.

Fuente: Propia

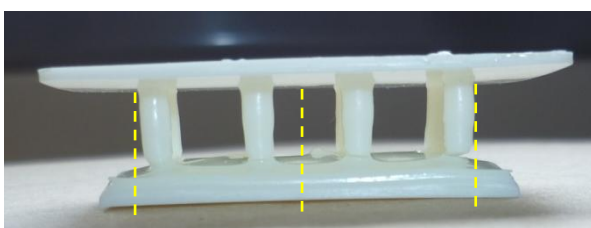


Fig. 9.19. Detalle de la no verticalidad de los soporte de la pieza probeta 4.

Fuente: Propia

Como se puede ver en las figura 9.18 y 9.19, los soportes únicamente son completamente verticales en la zona central de la pieza, mientras que en los extremos se aprecia claramente que tienen un cierto grado de inclinación hacia el interior. Inicialmente se ha pensado que esta deformación podría haber sido debida a la recirculación de resina comentada en el apartado 6.6. No obstante, debido a la manera de cómo pierden la verticalidad dichos soportes y a la baja viscosidad de la resina, se cree que esta deformación es debida a la flexión del Teflón cuando se separa de la resina recién solidificada.

Por lo tanto, se ha reconsiderado la hipótesis tomada en el apartado 6.3 referente a suponer el teflón totalmente rígido a la hora de plantear las fuerzas de separación surgidas durante el proceso de impresión. Así que, se han replanteado dichas fuerzas para poder explicar este fenómeno.

9.5.2 Reconsideración de las fuerzas planteadas

Como se acaba de comentar en el apartado anterior, se han replanteado las fuerzas de separación surgidas durante el proceso de impresión teniendo en cuenta la flexión del teflón.

Así que, una vez la plataforma aplica la carga uniforme para intentar separar la resina solidificada del interior de la cubeta, se produce una flexión del Teflón. Este hecho ocurre debido a que la película de Teflón, además de tener propiedades elásticas, está únicamente fijada por sus extremos, permitiendo de esta manera un desplazamiento de la parte central tal y como se ha explicado en el apartado 5.5.2. Por lo tanto, esta curvatura del teflón provoca la descomposición de la fuerza vertical aplicada por la plataforma en una fuerza normal y otra transversal, como se muestra en el esquemático de la figura 9.20.

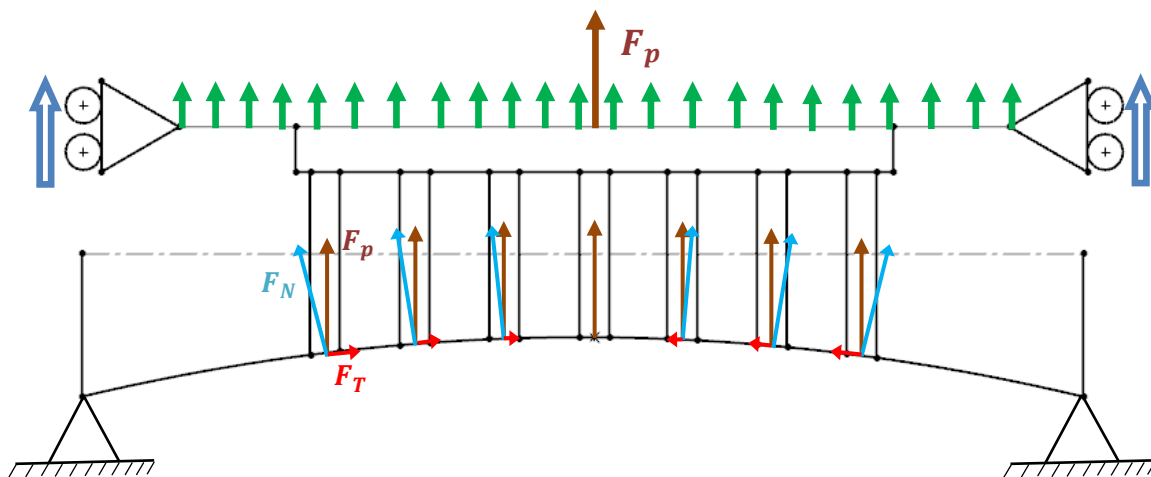


Fig. 9.20 Representación esquemática de la fuerza de separación en el proceso de impresión teniendo en cuenta la flexión del teflón.

Fuente: Propia

Como se muestra en la figura 9.20, la fuerza vertical realizada por la plataforma se descompone en una fuerza normal y una transversal. A continuación, en la figura 9.21, se muestra estas fuerzas algo más detalladas y la demostración del valor de las fuerzas.

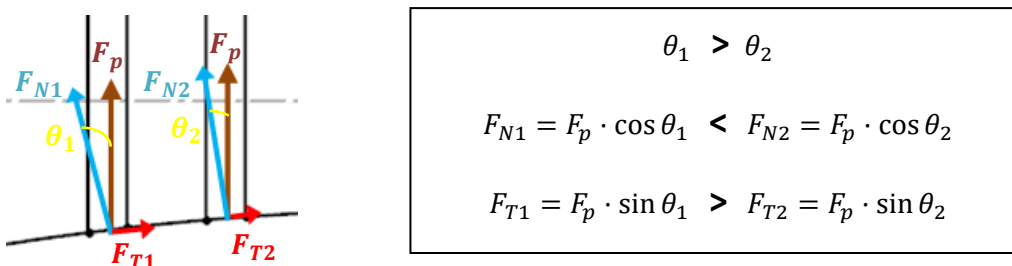


Fig. 9.21. Izquierda, Detalle de las fuerzas de separación teniendo en cuenta la flexión del Teflón. Derecha, demostración del valor de las fuerzas.

Fuente: Propia

Tal y como se muestra en la figura 9.21, cuanto más alejado se esté del centro, la fuerza normal a la superficie disminuye y la transversal aumenta. Es precisamente esta fuerza transversal la que provoca, como se ha observado en las figuras 9.18 y 9.19 del apartado anterior, que los soportes situados más al exterior tengan una cierta inclinación hacia el interior. Además, no únicamente hace deformar dichos soportes, sino que también implica la deformación de toda la pieza, haciendo que ésta no sea completamente recta, tal y como debería ser. A continuación, en las figuras 9.22 y 9.23, se muestra esta curvatura que presenta la pieza con más detalle, provocada por la flexión del teflón.

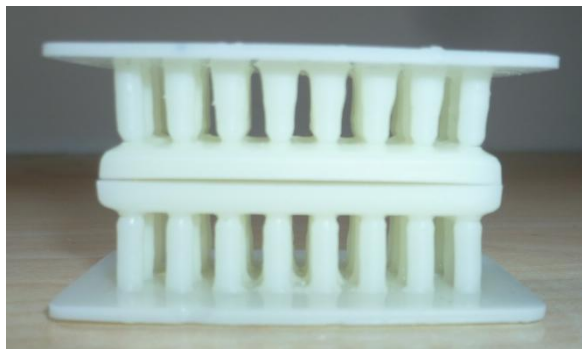


Fig. 9.22 Pieza probeta 2 sobre pieza probeta 1
Fuente: Propia

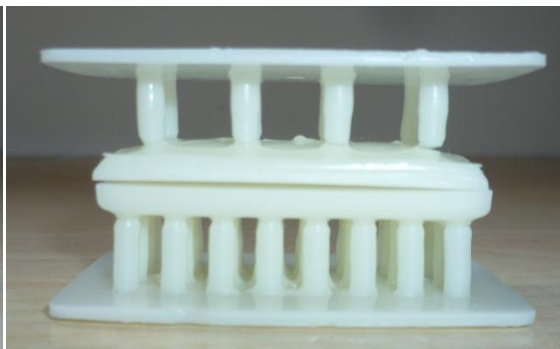


Fig. 9.23 Pieza probeta 4 sobre pieza probeta 1
Fuente: Propia

Mediante las figuras 9.22 y 9.23 se quiere mostrar de una manera más visual cómo la pieza rectangular no es completamente plana. Se observa debido al espacio que hay entre dos piezas probeta al ponerlas en contacto. Además se puede apreciar que en la figura 9.23, el espacio entre piezas es más pronunciado, debido a que la pieza probeta 4 presenta demasiada distancia entre soportes y el efecto de la flexión del Teflón es más pronunciado.

9.5.3 Posible solución

Para dar una solución al nuevo problema planteado, es necesario contrarrestar de algún modo las fuerzas transversales surgidas por la flexión del teflón. Dicha flexión es necesaria para que la pieza no se despegue de golpe y, en consecuencia, la fuerza de separación sea menor y no se aplique de manera brusca, tal y como se ha explicado en el apartado 5.5.2. Así que, la opción de cambiar el teflón por otro material completamente rígido no es factible.

Una posible solución es rediseñar los soportes para que puedan contrarrestar dichas fuerzas. Actualmente en *BCN3D Technologies* se está empezando a realizar pruebas con soportes en forma de estructura, es decir, unidos por la parte inferior y con formas típicas de andamiaje, como se puede ver en las figuras 9.24 y 9.25.

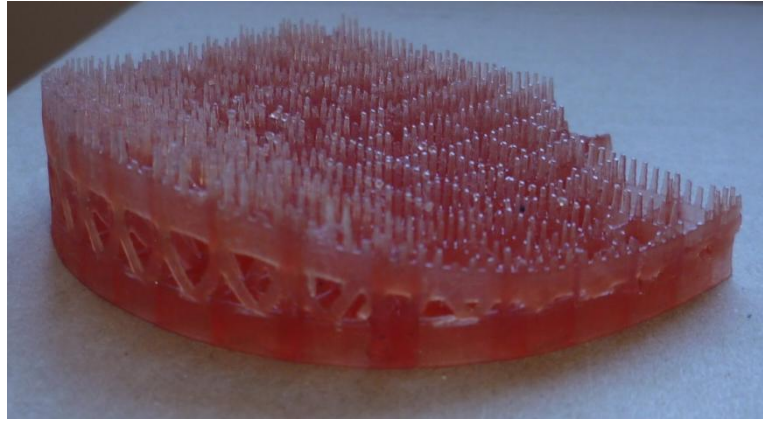


Fig. 9.24 Soportes en forma de andamiaje
Fuente: Propia

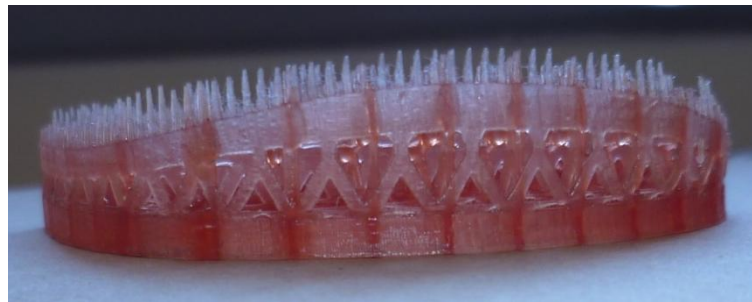


Fig. 9.25 Detalle de los soportes en forma de andamiaje
Fuente: Propia

Este tipo de soportes han sido creados por un software privado y parece ser que son capaces de contrarrestar estas fuerzas tangenciales debido a las columnas inclinadas que presenta su estructura, como se puede observar en la figura 9.25. Además, según el personal de la empresa parece ser que apenas dejan marcada la pieza. No obstante, el resto de consideraciones tomadas siguen teniendo validez, ya que la fractura de la pieza durante el proceso de impresión seguirá siendo debida a la tracción de las fibras si no se cumpliera la relación mínima de áreas. Únicamente hay que tener en cuenta esta componente transversal para rediseñar los soportes, de manera que supondría un nuevo estudio.

10. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y COSTES

10.1 Planificación temporal. Diagrama de Gantt

Para plasmar la planificación temporal que se ha llevado a cabo durante todo el proyecto se ha realizado un diagrama de Gantt. La duración total del proyecto ha sido en torno a tres meses (trece semanas), que comienzan el 30 de marzo de 2016 con la validación del proyecto y finaliza el 23 de junio de 2016 con la entrega de la memoria. A continuación se muestra la planificación temporal llevada a cabo según diferentes tareas que se han ido realizado con el paso de las semanas.

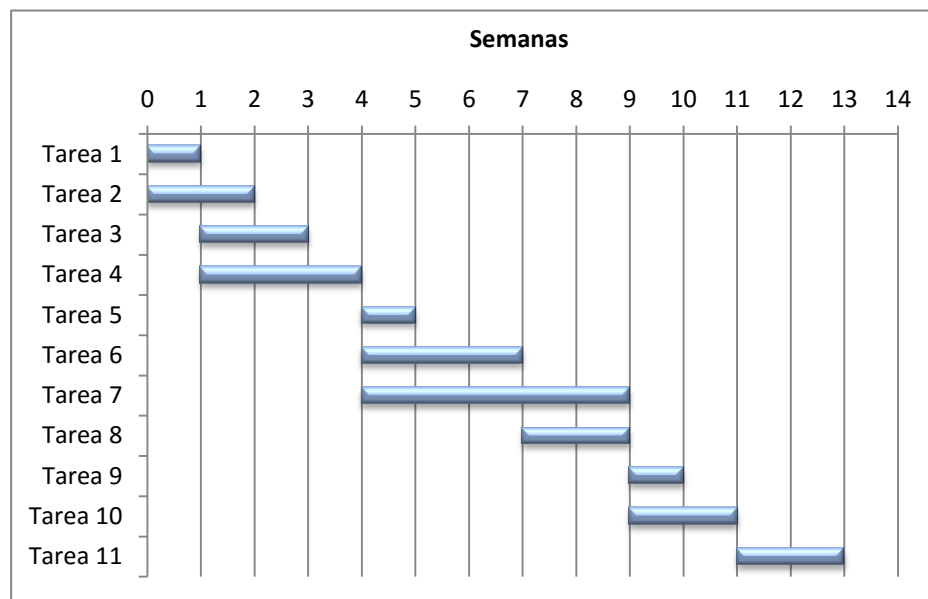


Fig. 10.1. Planificación temporal del proyecto
Fuente: Propia

- **Tarea 1:** Planteamiento del proyecto. Objetivos y alcance
- **Tarea 2:** Documentación sobre la impresión 3D
- **Tarea 3:** Documentación sobre las tecnologías de impresión 3D
- **Tarea 4:** Documentación profundizada sobre la tecnología DLP
- **Tarea 5:** Estudio de la impresora LUX de BCN3D Technologies
- **Tarea 6:** Aprendizaje del uso de distintos softwares
- **Tarea 7:** Análisis y estudio del proceso de impresión
- **Tarea 8:** Análisis y estudio de las estructuras de soporte
- **Tarea 9:** Definición del proceso experimental y modelaje de las probetas
- **Tarea 10:** Impresión de las probetas
- **Tarea 11:** Conclusiones según los resultados obtenidos

10.2 Costes del proyecto

Para el desarrollo de este proyecto, los costes principales han sido debidos al personal encargado de realizar el proyecto y al material utilizado para la impresión de las piezas, que se detallarán a continuación. Debido a la condición de estudiante encargado de realizar el proyecto de fin de grado, se ha tenido acceso a la máquina sin ningún tipo de restricción en cantidad de empleo. Respecto al tiempo de empleo, tampoco se ha tenido restricción, pero debido a que la máquina ha estado inoperativa un cierto período de tiempo, únicamente se ha podido utilizar en la fase final del proyecto.

Por lo que respecta a los costes relacionados con la utilización de los distintos softwares a lo largo del proyecto, cabe decir que dichos costes han sido nulos. El motivo es que el software propio de la LUX y el que finalmente se ha empleado para la creación de los soportes de las piezas probeta, el *CreationWorkshop*, se me ha facilitado de forma gratuita por la condición de estudiante realizando un proyecto de fin de grado para *BCN3D Technologies*. En relación al uso del resto de softwares para la preparación del modelo digital (*MeshMixer* y *B9Creator*), cabe decir que son de carácter libre, es decir, se han obtenido de forma gratuita.

Por último, el tiempo de impresión de las cuatro piezas probeta ha supuesto la utilización de la máquina durante 3,53 horas. No obstante, no se ha podido cuantificar ni el coste por hora de impresión de las piezas, ni el coste de amortización de la máquina debido a la confidencialidad de la empresa.

A continuación, en la tabla 10.1, se detalla el coste del material empleado para la impresión de las cuatro piezas probeta.

Concepto	Coste por litro[€/l]	Volumen total de piezas impresas [l]	Coste del material empleado [€]
Resina SPOT-LV	72	0,017*	1,224

Tabla 10.1. Coste del material de impresión empleado en las cuatro piezas probeta.

Volumen pieza probeta 1 [cm ³]	Volumen pieza probeta 2 [cm ³]	Volumen pieza probeta 3 [cm ³]	Volumen pieza probeta 4 [cm ³]	Volumen total de piezas impresas [cm ³]	Volumen total de piezas impresas [l]
4,640	4,660	3,939	3,944	17,183	0,017*

Tabla 10.2. Detalle del volumen de cada pieza probeta. Obtenida directamente por el software *CreationWorkshop*.

A pesar de que únicamente se ha utilizado una centésima parte de la resina líquida, en el coste total se tendrá en cuenta el precio del litro de resina. A este precio de adquisición del material, se debe sumar el coste asociado al personal que ha realizado el proyecto, que en este caso se ha considerado un precio por hora de ingeniero en prácticas de 20 euros/hora y una dedicación total de 280 horas. Dichas horas han sido repartidas en un total de 14 semanas, con una dedicación de 20 horas semanales, considerando semanas de cinco días, lo que ha supuesto una dedicación de 4 horas al día durante 70 días laborables. El tiempo dedicado a cada actividad, se ha repartido según el diagrama de Gantt expuesto en el apartado 10.1.

Por lo tanto, un ingeniero en prácticas que supondría un coste a la empresa de 20 euros/hora, y con una dedicación total de 280 horas, el coste total asociado al personal es de 5.600 €.

Finalmente, sumando al coste del personal, el coste de adquisición del material y teniendo en cuenta que no se ha cuantificado el coste de empleo de la máquina durante las 3,53 horas de impresión, el coste total del proyecto se estima en: 5.672 €

11. ASPECTOS AMBIENTALES

11.1 Impacto medioambiental

En general, la impresión 3D representa un impacto medioambiental positivo en comparación con el resto de sistemas de fabricación, debido al poco excedente de material generado para poder crear las piezas. Además, se estima que el consumo de recursos serán eficientemente utilizados debido a la producción bajo demanda que ofrece la impresión 3D. Finalmente y debido a la producción a pequeña escala, esta tecnología de fabricación representa una huella de carbono menor que el resto.

En relación al material de impresión, la resina fotosensible (SPOT-LV) empleada pasa a ser un termoplástico al polimerizar, que puede fundirse y reciclarse. Este tipo de plástico no presenta ningún riesgo para el medio ambiente, así que tanto los soportes retirados, como las piezas que se deseen desechar, se podrán reciclar directamente sin ningún tratamiento previo. En el anexo se adjunta el MSDS de la resina empleada, la SPOT-LV, donde se exponen los datos de seguridad y los potenciales peligros entre otros datos.

Al igual que ocurre con el material de impresión, los alcoholes utilizados para dar un mejor acabado a las piezas tampoco presentan ningún riesgo para el medioambiente, así que dichos alcoholes se pueden depositar directamente en los sistemas de desguace sin pasar por un proceso de descontaminación previo.

Finalmente, y en relación a la contaminación y emisiones, se puede considerar una tecnología de fabricación limpia, ya que la LUX funciona con corriente eléctrica y debido a que el proceso de polimerización de la resina se lleva a cabo mediante la luz, no se producen emisiones de gases de ningún tipo.

Así pues, se puede concluir que la LUX emite una huella de carbono mínima y es respetuosa con el medioambiente.

CONCLUSIONES

Mediante la realización del proyecto, tanto en la parte teórica como en la experimental, se ha podido determinar una serie de parámetros que ayudarán a que las impresiones se realicen de forma satisfactoria. Entre ellas destacan una distancia mínima que debe haber entre los distintos soportes y una relación mínima de áreas. Esta última, como se ha explicado anteriormente, no se le puede asignar un valor numérico así que serían necesarias nuevas experimentaciones.

Por otro lado, aunque es cierto que un proceso de impresión de estas características depende de una gran cantidad de factores, mediante el proceso experimental se ha podido determinar que fenómenos como la flexión del teflón o el estancamiento de resina, son factores muy a tener en cuenta a la hora preparar un modelo antes de imprimirlo y, por lo tanto, para un diseño óptimo de los soportes.

Por contra, un aspecto del que no ha sido posible sacar conclusiones es el tamaño de punta adecuado para que los soportes no dejen marcada la pieza a la vez de permitir que la impresión sea satisfactoria. Es posible que adoptando la posible solución de unir los soportes entre sí, permitan resistir más las fuerzas y, en consecuencia, poder reducir el tamaño de la punta de soportes para que no dejen marca. Otro aspecto importante con falta de determinación ha sido los parámetros de impresión, como el tiempo de exposición de la resina empleada, el cual se ha comprobado en el proceso experimental que no ha sido más del adecuado.

Posibles actuaciones futuras

Del proyecto se desprende la necesidad de realizar futuros estudios teniendo en cuenta la flexión del Teflón, para rediseñar los soportes e intentar determinar otra relación de área mínima y distancia entre soportes más acotada, además de poder contrarrestar las fuerzas transversales surgidas por dicha flexión.

Por otro lado, también hay la necesidad de determinar un tiempo de exposición por capa adecuado para el tipo de resina utilizado y que de esta forma las medidas de la pieza sean exactamente iguales que las del modelo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ANDREI VAZHNOV, *Impresión 3D. Cómo va a cambiar el mundo*. Editorial Baikal: 2013, Capítulo 2: De la edad de piedra a la edad de acción.
- [2] Historia de las impresoras 3D. [<http://www.impresoras-3d.info/historia-de-las-impresoras-3d>, 1 de abril de 2016]
- [3] HOD LIPSON & MELBA KURMAN, *La revolución de la impresión 3D*. Grupo Anaya: 2015, p. 38-43.
- [4] ANDREI VAZHNOV, *Impresión 3D. Cómo va a cambiar el mundo*. Editorial Baikal: 2013, Capítulo 2: De la edad de piedra a la edad de acción.
- [5] HOD LIPSON & MELBA KURMAN, *La revolución de la impresión 3D*. Grupo Anaya: 2015, p. 51-52.
- [6] HOD LIPSON & MELBA KURMAN, *La revolución de la impresión 3D*. Grupo Anaya: 2015, p.145
- [7] ANDREI VAZHNOV, *Impresión 3D. Cómo va a cambiar el mundo*. Editorial Baikal: 2013, Capítulo 5: Impresión 3D en medicina, construcción y alimentación.
- [8] HOD LIPSON & MELBA KURMAN, *La revolución de la impresión 3D*. Grupo Anaya: 2015, p.148
- [9] Impresión 3D para fabricación aeronáutica, Startasys. [<http://www.stratasys.com/es/industrias/aeroespacial/Airbus>, 10 de abril de 2016]
- [10] HOD LIPSON & MELBA KURMAN, *La revolución de la impresión 3D*. Grupo Anaya: 2015, p.249-250
- [11] ANTHONY ATALA, Conferencia TED Marzo 2011. [https://www.ted.com/talks/anthony_atala_printing_a_human_kidney?language=es, 10 de abril de 2016]
- [12] El fichero STL. [<http://www.r3ald.com/que-es-un-fichero-stl>, 15 de abril de 2016]
- [13] ANDREI VAZHNOV, *Impresión 3D. Cómo va a cambiar el mundo*. Editorial Baikal: 2013, Capítulo 7: La dura realidad.

- [14] JAIME LÓPEZ & PILAR RAMÍREZ, *Tecnologías aditivas, un concepto más amplio que el de prototipado rápido*. XV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Huesca, julio 2011. [http://www.aepro.com/files/congresos/2011huesca/CIIP11_2133_2146.3403.pdf, 18 de abril de 2016]
- [15] Modelado por deposición fundida (FDM). [<http://www.impresoras3d3.com/que-es-la-impresion-3d/>, 20 de abril de 2016]
- [16] [17] [18] 3D Printing process. [<http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/processes/>, 21 de abril de 2016]
- [19] Propiedades de la LUX. [<https://www.bcn3dtechnologies.com/es/catalog/bcn3d-lux-2/>, 25 de abril de 2016]
- [20] Arduino Mega 2560. [<http://arduino.cl/arduino-mega-2560/>, 28 de abril de 2016]
- [21] Pololu drivers. [<http://www.zonamaker.com/impresion-3d/crea-impresora/3-electronica-crea-imp>, 28 de abril de 2016]
- [22] Motor NEMA23. [<http://www.hobbytronics.co.za/p/578/nema-23-stepper-motor>, 30 de abril de 2016]
- [23] Resina fotosensible, fotoiniciadores. [<http://3dprinter.wikidot.com/photoactive-resins>, 6 de mayo de 2016]
- [24] Tracción simple. [<https://www.uclm.es/profesorado/porrasysoriano/elementos/Tema01.pdf>, 25 de mayo de 2016]
- [25] YUNUS ÇENGEL & JHON CIMBALA, *Mecánica de fluidos; Fundamentos y aplicaciones*. Mc Graw Hill: 2006, p.47
- [26] Consideraciones a la hora de imprimir. [http://www.kudo3d.com/downloads/Kudo3D_Printing_Guide_v1.7, 30 de mayo de 2016]

ANEXOS

A.1 MSDS de la resina SPOT-LV

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

Spot-LV

FILE NO.: 004

MSDS DATE: 04 / November / 2013

SECTION 1: PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION

PRODUCT NAME: Spot-LV
SYNONYMS: Special Order for Kyle von Hasseln
PRODUCT CODES:

MANUFACTURER: Sonnaya Ullitka S.L.
DIVISION: Spot-A Materials
ADDRESS: Calle Lluïa, nº 319-321, 08019 Barcelona, Spain

EMERGENCY PHONE (Europe): 112
CHEMTREC PHONE:
OTHER CALLS: +34 931867412
FAX PHONE:

CHEMICAL NAME:
CHEMICAL FAMILY: Aliphatic Acrylate
CHEMICAL FORMULA:

PRODUCT USE: Photoactive Resin
PREPARED BY:

SECTION 1 NOTES:

SECTION 2: COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS

INGREDIENT: REPORTABLE	CAS NO.	% WT	% VOL	SARA 313
Aliphatic Acrylates		90-100%		
Phosphine Oxide type Photoinitiator		1.5%		

A PEL or TLV has not been established

SECTION 2 NOTES:

SECTION 3: HAZARDS IDENTIFICATION

EMERGENCY OVERVIEW: WARNING



Warning



Irritant

Flamability: 0
Health: 1
Reactivity: 0
Other: 0

ROUTES OF ENTRY: May be absorbed through the skin

POTENTIAL HEALTH EFFECTS

ACUTE HEALTH HAZARDS:
EYES: Moderate eye irritant

SKIN: Slight skin irritant/may cause skin sensitization

INGESTION: No data found; not expected to be an ingestion hazard

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

Spot-LV

FILE NO.: 004
MSDS DATE: 04 / November / 2013

INHALATION: May cause respiratory tract irritation

CHRONIC HEALTH HAZARDS: No appropriate human or animal chronic health effects data known to exist.

MEDICAL CONDITIONS GENERALLY AGGRAVATED BY EXPOSURE:

SECTION 3 NOTES:

SECTION 4: FIRST AID MEASURES

INHALATION

If overcome by exposure, remove victim to fresh air immediately. Give oxygen or artificial respiration as needed. Obtain emergency medical attention. Prompt action is essential.

EYE CONTACT

In case of eye contact, immediately rinse with clean water for 20-30 minutes. Retract eyelids often. Obtain emergency medical attention.

SKIN CONTACT

Remove contaminated clothing as needed. Wash skin thoroughly with mild soap/water. Flush with lukewarm water for 15 minutes. If sticky, a waterless cleaner may be used.

INGESTION

Ingestion unlikely. However, if ingested, obtain emergency medical attention.

EMERGENCY MEDICAL TREATMENT PROCEDURES

If pain, blinking, tears, or redness continue, patient should contact ophthalmologist.

SECTION 4 NOTES:

SECTION 5: FIRE-FIGHTING MEASURES

FLASH POINT METHOD=(PMCC)
GT 93C/200F

AUTOIGNITION TEMP. METHOD=
N/DA

FLAMMABLE LIMITS (% VOLUME IN AIR)

LOWER: N/DA

UPPER: N/DA

FIRE AND EXPLOSION HAZARDS

High temperatures, inhibitor depletion, accidental impurities, or exposure to radiation or oxidizers may cause spontaneous polymerizing reaction generating heat/pressure. Closed containers may rupture or explode during runaway polymerization.

EXTINGUISHING MEDIA

Dry chemical
CO2
Water spray
Foam
Water fog

SPECIAL FIREFIGHTING PROCEDURES

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

Spot-LV

FILE NO.: 004
MSDS DATE: 04 / November / 2013

Do not enter fire area without proper protection. See Section 4 - decomposition products possible. Fight fire from safe distance/protected location. Heat/impurities may increase temperature/build pressure/rupture closed containers, spreading fire, increasing risk of burns/injuries. Water may be ineffective in firefighting due to low solubility. Use water spray/fog for cooling. Pressure relief system may plug with solids, increasing risk of overpressure. Notify authorities if liquid enters sewer/public waters.

SECTION 5 NOTES:

SECTION 6: ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

ACCIDENTAL RELEASE MEASURES:

PRECAUTIONS IF MATERIAL IS SPILLED OR RELEASED

Spilled or released material may polymerize and release heat/gases. Extinguish all ignition sources and ventilate area. Wear protective equipment during clean-up. Dike and recover large spill. Soak up small spill with inert solids (such as vermiculite, clay) and sweep/shovel into vented disposal container. Wash spill area with a strong detergent and water solution; rinse with water but minimize water use during clean-up. For spills on water, contain, minimize dispersion and collect. Dispose/report per regulatory requirements.

WASTE DISPOSAL METHODS

Non-contaminated, properly inhibited material is not a RCRA hazardous waste. However, contaminated material/soil/water may be RCRA/OSHA hazardous waste due to potential for internal heat generation (see 40 CFR 261 and 29 CFR 1910).

It is the responsibility of the generator to determine at the time of disposal whether the material meets the criteria of a hazardous waste. Comply with all applicable federal, state and local regulations. Use registered transporters. Disposal options include landfilling solids at permitted sites; fuel blending or incinerating liquids. Assure emissions comply with applicable regulations. Dilute aqueous waste may biodegrade; avoid overloading/poisoning plant biomass. Assure effluent complies with applicable regulations.

SECTION 6 NOTES:

SECTION 7: HANDLING AND STORAGE

HANDLING AND STORAGE PROCEDURES

Wear appropriate protective equipment when handling this material (See Section 8 of MSDS). Most acrylic monomers have low viscosities; hence, pouring, material transfer and processing of these materials do not necessitate heating. Viscous monomers may require heating to facilitate handling. To facilitate product transfer from original container, product may be heated to 60C/140F for not more than 24 hours. Do NOT use localized heat sources such as band heaters to heat/melt product. Do NOT use steam. Hot boxes or hot rooms are recommended for heating/melting material. The hot box or hot room should be set at a maximum temperature of 60C/140F. Do not overheat--this may compromise product quality and/or result in an uncontrolled hazardous polymerization. If product freezes, heat as indicated above and mix gently to redistribute the inhibitor. Product should be consumed in its entirety after heating/melting--avoid multiple "re-heats" which may affect product quality or result in product degradation. Product is packaged with inhibitor(s). Unless inhibited, product can polymerize, raising temperature and pressure possibly rupturing container. Check inhibitor content periodically, adding to bulk material if needed. In addition, the product's inhibitor(s) require the presence of dissolved oxygen. Maintain, at a minimum, the original headspace in the product container and do not blanket or mix with oxygen-free gas as it renders inhibitor ineffective. Ensure air space (oxygen) is present during product heating/melting.

SECTION 7 NOTES:

SECTION 8: EXPOSURE CONTROLS/PERSONAL PROTECTION

RESPIRATORY PROTECTION

:
If this material is handled at elevated temperature or under mist forming conditions, NIOSH/MSHA approved respiratory protection equipment should be used.

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

Spot-LV

FILE NO.: 004
MSDS DATE: 04 / November / 2013

Eye protection such as chemical splash goggles and/or face shield must be worn when possibility exists for eye contact due to splashing or spraying liquid, airborne particles, or vapor. Contact lenses should not be worn.

SKIN PROTECTION

Depending on the conditions of use, protective gloves, apron, boots, head and face protection should be worn. This equipment should be cleaned thoroughly after each use.

ENGINEERING CONTROLS

If this material is handled at elevated temperature or under mist forming conditions, NIOSH/MSHA approved respiratory protection equipment should be used.

OTHER HYGIENIC PRACTICES

Emergency eye wash fountains and safety showers should be available in the immediate vicinity of any potential exposure.

OTHER WORK PRACTICES

Use good personal hygiene practices. Wash hands before eating, drinking, smoking, or using toilet facilities. Promptly remove soiled clothing/wash thoroughly before reuse. Shower after work using plenty of soap and water.

SECTION 8 NOTES:

SECTION 9: PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

APPEARANCE: Clear, pale yellow liquid

ODOR: Low odor

PHYSICAL STATE: Liquid

pH AS SUPPLIED: AP 6.8 to 7.2

pH (Other):

BOILING POINT: N/DA

MELTING POINT: N/DA

FREEZING POINT: N/DA

VAPOR PRESSURE (mmHg): Negligible

VAPOR DENSITY (AIR = 1): N/AP

SPECIFIC GRAVITY (H₂O = 1): AP 1.10-1.12 at 25C/77F

EVAPORATION RATE: Negligible

BASIS (=1):

SECTION 9: PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES (con't)

SOLUBILITY IN WATER: Negligible

PERCENT SOLIDS BY WEIGHT: 2%

PERCENT VOLATILE: 0%

VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS (VOC): Nil

MOLECULAR WEIGHT: N/DA

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

Spot-LV

FILE NO.: 004
MSDS DATE: 04 / November / 2013

VISCOSITY: AP 80 to 150 cps at 25C/77F

SECTION 9 NOTES:

SECTION 10: STABILITY AND REACTIVITY

STABLE

UNSTABLE

STABILITY: Stable

CONDITIONS TO AVOID (STABILITY):

High temperatures, localized heat sources (ie, drum or band heaters), oxidizing conditions, freezing conditions, direct sunlight, ultraviolet radiation, inert gas blanketing; Strong oxidizers, strong reducers, free radical initiators, inert gases, oxygen scavengers

INCOMPATIBILITY (MATERIAL TO AVOID):

HAZARDOUS DECOMPOSITION OR BY-PRODUCTS:

Acid smoke-fumes/carbon monoxide/carbon dioxide and perhaps other toxic vapors may be released during a fire involving this product.

HAZARDOUS POLYMERIZATION: May occur

CONDITIONS TO AVOID (POLYMERIZATION): Leave appropriate headspace above surface level to provide Oxygen inhibition for best stability.

SECTION 10 NOTES:

SECTION 11: TOXICOLOGICAL INFORMATION

ROUTES OF EXPOSURE

INHALATION

No significant signs or symptoms indicative of any adverse health hazard are expected to occur at standard conditions due to the low volatility of this material. However, aerosols, or vapors which may be generated at elevated processing temperatures, may cause respiratory tract irritation. Symptoms of irritation may include coughing, mucous production and shortness of breath.

EYE CONTACT – PRIMARY ROUTE

May cause moderate irritation with symptoms including burning sensation, tearing, redness or swelling.

SKIN ABSORPTION -- PRIMARY ROUTE

Some acrylate materials are absorbed through the skin. Although no appropriate human or animal health effects data are known to exist, the potential for skin absorption does exist for this material.

SKIN IRRITATION -- PRIMARY ROUTE

May cause minor skin irritation. Symptoms of irritation may include a slight localized redness or rash and swelling. Although no appropriate human or animal health effects data is known to exist, this material may cause an allergic skin reaction (sensitization) in susceptible individuals upon repeated exposure.

INGESTION

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

Spot-LV

FILE NO.: 004
MSDS DATE: 04 / November / 2013

Although no appropriate human or animal health effects data is known to exist, this material is not expected to be an ingestion hazard.

MEDICAL CONDITIONS AGGRAVATED BY EXPOSURE

This material or its emissions may induce an allergic or sensitization reaction and thereby aggravate systemic disease.

SECTION 11 NOTES:

SECTION 12: ECOLOGICAL INFORMATION

ECOLOGICAL INFORMATION:

DECONTAMINATION PROCEDURES

Follow standard plant procedures or supervisor's instructions for decontamination operations.

SECTION 12 NOTES:

SECTION 13: DISPOSAL CONSIDERATIONS

PRECAUTIONS IF MATERIAL IS SPILLED OR RELEASED

Spilled or released material may polymerize and release heat/gases. Extinguish all ignition sources and ventilate area. Wear protective equipment during clean-up. Dike and recover large spill. Soak up small spill with inert solids (such as vermiculite, clay) and sweep/shovel into vented disposal container. Wash spill area with a strong detergent and water solution; rinse with water but minimize water use during clean-up. For spills on water, contain, minimize dispersion and collect. Dispose/report per regulatory requirements.

WASTE DISPOSAL METHODS

Non-contaminated, properly inhibited material is not a RCRA hazardous waste. However, contaminated material/soil/water may be RCRA/OSHA hazardous waste due to potential for internal heat generation (see 40 CFR 261 and 29 CFR 1910).

It is the responsibility of the generator to determine at the time of disposal whether the material meets the criteria of a hazardous waste. Comply with all applicable federal, state and local regulations. Use registered transporters. Disposal options include landfilling solids at permitted sites; fuel blending or incinerating liquids. Assure emissions comply with applicable regulations. Dilute aqueous waste may biodegrade; avoid overloading/poisoning plant biomass. Assure effluent complies with applicable regulations.

SECTION 14: TRANSPORT INFORMATION

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION

PROPER SHIPPING NAME:
HAZARD CLASS:
ID NUMBER:
PACKING GROUP:
LABEL STATEMENT:

WATER TRANSPORTATION

PROPER SHIPPING NAME:
HAZARD CLASS:
ID NUMBER:
PACKING GROUP:
LABEL STATEMENTS:

AIR TRANSPORTATION

PROPER SHIPPING NAME:
HAZARD CLASS:
ID NUMBER:
PACKING GROUP:
LABEL STATEMENTS:

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

Spot-LV

FILE NO.: 004
MSDS DATE: 04 / November / 2013

OTHER AGENCIES:

SECTION 14 NOTES:

SECTION 15: REGULATORY INFORMATION

U.S. FEDERAL REGULATIONS

TSCA (TOXIC SUBSTANCE CONTROL ACT):

TSCA status: All components of this product are listed, or excluded from listing, on the United States Environmental Protection

TSCA Section 12(b):

TSCA Section 12(b) - Export Notification: This product does not contain any chemicals at concentrations subject to Section 12(b) export notification.

CALIFORNIA PROPOSITION 65:

California Proposition 65 Information: This product contains, or may contain, trace quantities of a substance(s) known to the state of California to cause cancer and/or reproductive toxicity.

Agency Toxic Substances

Control Act (TSCA) inventory.

CERCLA (COMPREHENSIVE RESPONSE COMPENSATION, AND LIABILITY ACT):

SARA TITLE III (SUPERFUND AMENDMENTS AND REAUTHORIZATION ACT):

311/312 HAZARD CATEGORIES:

NPCA - HMIS RATING

Health

2

Flammability

1

Reactivity

2

Personal protection**

D

**Respiratory protection may be necessary depending on conditions of use.

Refer to Section 8 of this MSDS for respiratory protection guidelines.

313 REPORTABLE INGREDIENTS:

STATE REGULATIONS:

INTERNATIONAL REGULATIONS:

SECTION 15 NOTES:

This material contains an inhibitor (HQ, MEHQ, etc.) at <1%. The type and amount meet product specifications.

*Note - qualifiers and codes used in this MSDS

EQ = Equal; AP = Approximately; LT = Less Than; GT = Greater Than;

TR = Trace; UK = Unknown; N/AP = Not Applicable; N/P = No Applicable

Information Found; N/DA = No Data Available

MATERIAL SAFETY DATA SHEET
Spot-LV

FILE NO.: 004
MSDS DATE: 04 / November / 2013

SECTION 16: OTHER INFORMATION

OTHER INFORMATION:

PREPARATION INFORMATION:

DISCLAIMER:

A.2 TDS de la resina SPOT-LV



Product



Extra Low Viscosity resin.

Description

Spot-LV has been developed on request of users that needed a similar product as Spot-GP with a much lower viscosity. We have come up with a solution for all those setups that rely on a viscosity that is below 50mPa*s (cps) while still maintaining the same reactivity and similar properties of the general purpose resins.

Also, this resin has a clear colouring, so with the correct postcuring can be used to create clear prints.

Spot-A Materials resins always brings low viscosity for effortless cleaning, material recovery and manipulation.

Technical Data

Mechanical Properties	Spot-LV v11 UV Postcured
Density [g/cm ³]	1.1
Experimental Shrinkage [%]	6
Force @ Peak [N]	320
Elong. @ Peak [%]	2
Young's Modulus [MPa]	726
Tensile strength [N/mm]	65
Tensile stress [MPa]	22
Tear strength [N/mm]	110
Shore A Hardness	NA
Shore D Hardness	78
Viscosity 20°C [mPa*s][cps]	~50

- Tensile properties as per ISO527-1A standard.
- Hardness properties as per ISO 7619.
- Viscosity values measured with DIN cup 4mm.

Safety

For additional information refers to the MSDS.

Spot-A Materials®

Sonnaya Ulitka, S.L.
C/ Lluís 321-329 · Edificio CINC
08019 BARCELONA
SPAIN
info@spotamaterials.com

The base materials to build your world

<http://www.spotamaterials.com>